



UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN GEOLOGÍA APLICADA Y GEOTECNIA

“ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD ACTUAL DE LA ERMITA SUR EN LA HIDROELÉCTRICA MAZAR”

TESIS PREVIA A LA
OBTENCIÓN DEL GRADO DE
MAGÍSTER EN GEOLOGÍA
APLICADA Y GEOTECNIA

AUTOR:

ING. LUIS MARIO ALMACHE SÁNCHEZ

DIRECTOR:

ING. JAIME BOJORQUE, PHD

CUENCA – ECUADOR

SEPTIEMBRE 2014



RESUMEN

La Hidroeléctrica Mazar presenta varios problemas relacionados con taludes inestables que afectan su normal funcionamiento y representan un riesgo para la represa construida.

El presente trabajo analiza la estabilidad de la ladera La Ermita Sur ubicado aguas arriba de la presa en el que diferentes factores desencadenaron un movimiento de esta masa.

Se realizó una modelación por medios computacionales del talud, analizando como factor primordial desencadenante el agua. Aplicando el método de equilibrio límite **MEL** por medio del método Morgenstern - Price se modeló en función de las propiedades físico – mecánicas originales del talud, se varió el nivel freático desde su profundidad original hasta la situación más desfavorable en la superficie del talud, esta modelación se la realizó para el plano de falla asumido en el talud y un plano buscado por el programa. Posteriormente aplicando análisis inverso por el método de sensibilidad se encontró los parámetros físicos – mecánicos con los cuales el talud está al límite de su equilibrio.

Se verificó los resultados obtenidos por **MEL** a través de la modelación por el método tenso – deformacional aplicando el método de elementos finitos **MEF** por medio de la reducción del esfuerzo cortante, los resultados obtenidos entre los dos métodos fueron similares, las zonas de falla del talud en ambos métodos fueron coincidentes.

En los dos métodos se aplicó condiciones estáticas y pseudo - estáticas para el talud, el criterio de rotura aplicado para todos los casos fue el de Mohr – Coulomb.

Palabras claves:

Equilibrio Límite, Tenso Deformacional, Morgenstern – Price, nivel freático.



ABSTRACT

Mazar Hydroelectric presents several problems related to unstable slopes that affect normal functioning and represent a risk to the dam built.

This paper discusses the slope stability of La Ermita Sur, located upstream of the dam in which different factors triggered a movement of this mass.

One modeling was performed by computational means of the slope, analyzing primary factor precipitating water. Applying the MEL limit equilibrium method, through method Morgenstern - Price is based model of the physical - mechanical original slope, the water table was varied from its original depth to the worst situation in the slope surface, this modeling was performed for the fault plane assumed in the batter and searched by the program level. Then applying the inverse analysis method sensitivity was found physical- mechanical parameters with which the slope is the limit of his equilibrium.

The results obtained by MEL through modeling by the method was verified tense-deformational applying the finite element method using MEF reduced shear, the results between the two methods were similar, areas of slope failure both methods were concordant.

In both methods and pseudo- static conditions are applied for static slope failure criterion applied to all cases was the Mohr – Coulomb.

Keywords:

Limit Equilibrium, Tensile Deformational, Morgenstern - Price, Water Table.



INDICE GENERAL

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
ÍNDICE GENERAL	4
ÍNDICE DE TABLAS	9
ÍNDICE DE GRÁFICOS	11
ÍNDICE DE FIGURAS	14
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS	15
SIMBOLOGÍA UTILIZADA	16
CLÁUSULA DE RESPONSABILIDAD	17
CLAUSULA DE RECONOCIMIENTO	18
DEDICATORIA	19
AGRADECIMIENTO	20

CONTENIDO

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y ASPECTOS GENERALES	21
1.1 Introducción y justificación	21
1.2 Ubicación del área de estudio	21
1.3 Vías de acceso	23
1.3.1 Vía Cuenca – Azogues– Mazar	23
1.3.2 Vía Cuenca – Paute - Mazar	24
1.4 Clima, suelo y vegetación de la zona	25
1.5 Hipótesis	26
1.6 Objetivos planteados	27
1.6.1 Objetivo general	27



1.6.2	Objetivos específicos	27
1.7	Metodología	28
1.8	Contenido de la tesis	29

CAPÍTULO II: GEOLOGÍA, GEOTECNIA Y SÍSMICA DE LA ZONA

31

2.1	Geología y geomorfología del área de investigación	31
2.1.1	Geomorfología regional	31
2.1.2	Geología regional	31
2.2	Geomorfología local	32
2.3	Geología y estratigrafía del área de investigación.	32
2.3.1	Depósito coluvial	33
2.3.2	Sub – unidad La Ermita	33
2.4	Geología estructural	34
2.5	Sísmica de la zona	36

CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ESTABILIDAD

38

3.1	Introducción	38
3.2	Hidrología de la zona	39
3.3	Factores hidrogeológicos	39
3.3.1	Infiltración	41
3.3.2	Evapotranspiración	44
3.3.3	Ecurrimiento	45
3.4	Permeabilidad	46
3.4.1	Ensayos en coluviones	47
3.4.2	Ensayos en el macizo rocoso “Unidad La Ermita”	47

CAPÍTULO VI: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y GEOFÍSICA DE LA ZONA

48

4.1	Introducción	48
4.2	Perforaciones	48
4.2.1	Perforación PE-1	49



4.2.2	Perforación PE-2	49
4.2.3	Perforación PE-3	49
4.2.4	Perforación PE-4	52
4.2.5	Perforación PE-8	53
4.2.6	Perforación PE-10	53
4.2.7	Perforación PE-11	54
4.2.8	Perforación EIN-1	54
4.2.9	Perforación EIN-4	54
4.2.10	Perforación EIN-5	55
4.2.11	Perforación EPZ-1	55
4.2.12	Perforación EPZ-2	55
4.2.13	Perforación EPZ-3	55
4.2.14	Perforación EPZ-4	55
4.3	Análisis de los datos de inclinómetros	56
4.3.1	Inclinómetro PE – 2	56
4.3.2	Inclinómetro PE – 3	56
4.3.3	Inclinómetro PE - 8	59
4.3.4	Inclinómetro PE - 10	60
4.3.5	Inclinómetro PE – 11	60
4.3.6	Inclinómetro EIN – 4	60
4.3.7	Inclinómetro EIN – 5	61
4.4	Análisis de los datos de piezómetros	64
4.5	Mojones monitoreados en la zona de estudio	67
4.5.1	Mojón TE – 4	68
4.5.2	Mojón PE –11	70
4.5.3	Resumen actividad mojones monitoreados en la zona	73
4.6	Ensayos de geofísica realizados en la zona	77
4.6.1	Introducción	77
4.6.2	Sísmica de refracción	78
4.6.3	Resistividad eléctrica	79
4.6.4	Correlación entre la geología y los métodos aplicados	80
4.6.5	Determinación de los módulos elásticos de cada capa	83



CAPÍTULO V: CARACTERIZACIÓN DEL DESLIZAMIENTO 86

5.1	Introducción	86
5.2	Correlación de la información recopilada	86
5.3	Características del material	89
5.3.1	Características de los coluviales	89
5.3.2	Características del macizo rocoso unidad La Ermita	90
5.3.3	Humedad y niveles freáticos identificados en la zona	90
5.4	Parámetros geométricos del deslizamiento	91
5.4.1	Introducción	91
5.4.2	Geometría de La Ermita Sur	92
5.4.3	Volumen de material estimado en el deslizamiento.	92
5.5	Modelo geológico del deslizamiento	94
5.5.1	Estado de actividad del movimiento	94
5.5.2	Tipo de movimiento	94
5.5.3	Velocidad del movimiento	95
5.6	Análisis de la masa en movimiento	97
5.6.1	Perfil asumido para la modelación	97
5.7	Caracterización del macizo	102
5.7.1	Introducción	102
5.7.2	Clasificación del macizo	102
5.7.3	Clasificación geomecánica de Bieniawski	103
5.7.4	Resistencia a la compresión simple	106
5.7.5	Criterios de resistencia o rotura	106
5.7.5.1	Criterios de rotura Mohr – Coulomb	107
5.7.6	Parámetros físicos - mecánicos de la zona en estudio	107

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD Y MODELIZACIÓN DEL TALUD 109

6.1	Introducción	109
6.2	Método de Equilibrio Límite	109
6.2.1	Método de Morgenstern-Price	111
6.3	Software Slide 5.0	112



6.4	Modelación del talud	113
6.4.1	Condiciones originales del talud	113
6.4.2	Condiciones originales del talud con coeficientes sísmicos	116
6.4.3	Factor de seguridad en función de diferentes niveles freáticos	120
6.4.4	Análisis inverso de las propiedades de los materiales	121
6.4.4.1	Análisis probabilístico	121
6.4.4.2	Análisis de sensibilidad	121
6.5	Método tenso – deformacional	126
6.5.1	Método de elementos finitos	126
6.6	Software a utilizar	126
6.7	Modelación del talud con Phase 2.	127
6.7.1	Condiciones originales del perfil	127
6.7.2	Reducción de la resistencia a cortante (SSR) en el perfil	129
6.7.3	Condiciones originales del perfil aplicando coeficientes sísmicos	134
6.7.4	Factor de seguridad en función de diferentes niveles freáticos	135
6.8	Comparación de resultados entre los métodos aplicados	136
6.9	Comparación de resultados entre plano de falla asumido y el calculado	137
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		139
7.1	Conclusiones	139
7.2	Recomendaciones de estabilización, mitigación y futuras líneas de investigación	140
7.3	Futuros análisis de investigación	141
REFERENCIAS:		142
ÍNDICE DE ANEXOS		144



INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Orientación de los sistemas de discontinuidades A, B, C	32
Tabla 2: Orientación de los sistemas de discontinuidades D, E, F	32
Tabla 3: Registro de precipitaciones, evapotranspiración, escurrimiento e infiltración registrados en La Ermita Sur	149
Tabla 4: Variaciones del nivel freático encontradas en las perforaciones realizadas en La Ermita Sur	166
Tabla 5: Datos y coordenadas de los perfiles geofísicos realizados en la zona de estudio	76
Tabla 6: Datos obtenidos de la Resistividad Eléctrica y su intersección con los perfiles de sísmica de refracción	77
Tabla 7: Resultados de la resistividad eléctrica y la sísmica de refracción realizada en la zona de estudio y su correlación con la geología del sector	80
Tabla 8: Estimación de los Módulos Elásticos Dinámicos en función de las líneas sísmicas registradas	81
Tabla 9: Módulos Elásticos Estáticos calculados presentes en las diferentes capas que conforman el talud en estudio	82
Tabla 10: Correlación entre las perforaciones realizadas, la geología y la geofísica de la zona de estudio	85
Tabla 11: Intensidad del desplazamiento, volumen vs velocidad	94
Tabla 12: Clasificación del macizo rocoso en función del índice RMR	100
Tabla 13: Variedad de estratos pertenecientes a la roca metamórfica presentes en la zona de estudio y capa asignada a los mismos	101
Tabla 14: Valores de RMR para la Capa I y Capa II en el deslizamiento	102
Tabla 15: Relación de litología en función de su resistencia a compresión uniaxial	103



Tabla 16: Parámetros físicos – mecánicos de la zona	105
Tabla 17: Métodos de equilibrio límite en función de la superficie de falla y del equilibrio de fuerzas y momentos	107
Tabla 18: Parámetros utilizados para la modelación con el software Phase 2 del deslizamiento La Ermita Sur	125
Tabla 19: Cuadro comparativo del resultado de los análisis con diferentes condiciones en La Ermita Sur	134
Tabla 20: Cuadro comparativo del resultado de los análisis con el plano de falla inferido y plano de falla calculado en diferentes condiciones de nivel freático	136



ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Representación estereográfica de las familias de discontinuidades en la zona de estudio	33
Gráfico 2: Precipitación media mensual que se registra en La Ermita Sur	37
Gráfico 3: Representación gráfica de la ecuación de Coulomb para suelos saturados	39
Gráfico 4: Precipitaciones e infiltraciones medias mensuales que se registran en La Ermita Sur	40
Gráfico 5: Precipitaciones y evapotranspiraciones medias mensuales que se registran en La Ermita Sur	41
Gráfico 6: Precipitaciones y escurrimiento directo promedios mensuales que se registran en la Ermita Sur	42
Gráfico 7: Perfil longitudinal en el deslizamiento La Ermita	47
Gráfico 8: Perfil transversal localizado en la parte media el deslizamiento La Ermita Sur	48
Gráfico 9: Desplazamiento registrado en el inclinómetro PE – 3 en función de la precipitación mensual acumulada	54
Gráfico 10: Registro de lecturas del inclinómetro PE – 3	55
Gráfico 11: Registro de lecturas del inclinómetro PE – 8	56
Gráfico 12: Relación entre la precipitación y el desplazamiento Registrado en el inclinómetro EIN – 04	57
Gráfico 13: Registro del desplazamiento vs precipitación obtenidos en el inclinómetro EIN – 5	58
Gráfico 14: Registro de desplazamientos localizados en los inclinómetros instalados del periodo 2005 al 2009	60
Gráfico 15: Registros de los niveles de agua medidos por los piezómetros existentes en la zona de estudio y su correlación con la pluviosidad en diferentes fechas	62



Gráfico 16: Fluctuaciones del nivel freático registrados en los piezómetros antes durante y después del llenado de la presa, registros desde el año 2007 hasta el año 2012	63
Gráfico 17: Relación directa entre la pluviometría y el desplazamiento ocurrido en el mojón TE – 4 año tras año	65
Gráfico 18: Azimut de movimiento del mojón TE – 4	65
Gráfico 19: Precipitación acumulada mensual registrada en el mojón TE – 4 y su relación con la velocidad	66
Gráfico 20: Relación entre la pluviometría y el desplazamiento ocurrido en el mojón PE - 11 año tras año	67
Gráfico 21: Azimut de movimiento del mojón PE – 11	67
Gráfico 22: Relación de la velocidad de movimiento con la precipitación registrada en el mojón PE – 11	68
Gráfico 23: Desplazamiento acumulado, su relación con la precipitación y los mojones colocados en el año 2010 en la zona del deslizamiento	70
Gráfico 24: Desplazamiento acumulado, su relación con la precipitación y los mojones colocados en el periodo 2006 - 2008 en la zona del deslizamiento	71
Gráfico 25: Velocidades registradas en los mojones del primer grupo, monitoreados hasta el año 2010	72
Gráfico 26: Velocidades registradas en los mojones del segundo grupo, monitoreados desde el año 2010	73
Gráfico 27: Azimut promedio de movimientos registrados hasta octubre del 2010 en la zona de La Ermita Sur	74
Gráfico 28: Dirección del perfil seleccionado B – B y su relación con los vectores de movimiento	96
Gráfico 29: Perfil B – B elegido para la modelación	97
Gráfico 30: Perfil B – B, capas de material coluvial, geofísica y perforaciones realizadas en la zona	98



Gráfico 31: Capas asignadas al Perfil B – B	102
Gráfico 32: Esquema estático del método Morgenstern-Price	108
Gráfico 33: Perfil utilizado para el análisis del talud	111
Gráfico 34: Factor de seguridad calculado en base al método de equilibrio límite de Morgenstern-Price para la situación real del talud	112
Gráfico 35: Variación del factor de seguridad en condiciones originales a lo largo del talud	113
Gráfico 36: Factor de seguridad para un sismo con una aceleración de 0,12 g	115
Gráfico 37: Factor de seguridad para un sismo con una aceleración de 0,24 g	116
Gráfico 38: Disminución del factor de seguridad conforme el nivel freático asciende	117
Gráfico 39: Análisis inverso por sensibilidad buscando los parámetros físicos – mecánicos para un factor de seguridad igual a la unidad	119
Gráfico 40: Valor de cohesión por análisis inverso para un factor de seguridad igual a la unidad	121
Gráfico 41: Valor del ángulo de fricción por análisis inverso para un factor de seguridad igual a la unidad	122
Gráfico 42: Modelización del talud por el Método de Elementos Finitos	125
Gráfico 43: Distribución de esfuerzos principales ocasionados al ejecutar la opción de carga gravitacional	126
Gráfico 44: Máximo esfuerzo por cortante que se produce en el talud	128
Gráfico 45: Desplazamiento horizontal producto de la reducción del esfuerzo cortante en el talud	128
Gráfico 46: Distribución de esfuerzos de corte – tensión en el talud	129
Gráfico 47: Desplazamiento absoluto producto de la reducción del esfuerzo cortante en el talud	129



Gráfico 48: Modelación del contorno inicial del talud y el contorno final a causa de un posible deslizamiento	130
Gráfico 49: Desplazamiento producto de un evento sísmico de 0,12 g	131
Gráfico 50: Zonas en donde se produciría desplazamientos a causa de un sismo de 0.24g	132
Gráfico 51: Alteración del FS fruto de la reducción del esfuerzo cortante a causa de la variación del nivel freático en el talud	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa político del Ecuador y ubicación de la zona en estudio	19
Figura 2: Vías de acceso a los diferentes proyectos hidroeléctricos dentro del país	21



ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1: Deslizamiento La Ermita Sur	20
Fotografía 2: Afloramiento de material coluvial presente en el deslizamiento	30
Fotografía 3: Afloramiento rocoso compuesto por cuarcitas presente en el deslizamiento	31
Fotografía 4: Escurrimiento superficial que se observa en la zona	43
Fotografía 5: Recuperación de testigos a diferente profundidad del Sondeo PE – 4	49
Fotografía 6: Recuperación de testigos a diferente profundidad del Sondeo PE – 4	49
Fotografía 7: Recuperación de testigos a diferente profundidad del Sondeo PE – 4	49
Fotografía 8: Recuperación de testigos a diferente profundidad del Sondeo PE – 4	49
Fotografía 9: Recuperación de testigos a diferente profundidad del Sondeo PE – 10	50
Fotografía 10: Recuperación de testigos a diferente profundidad del Sondeo PE – 10	50
Fotografía 11: Recuperación de testigos a diferente profundidad del Sondeo PE – 10	51
Fotografía 12: Recuperación de testigos a diferente profundidad del Sondeo PE – 10	51



SIMBOLOGÍA UTILIZADA

Símbolo	Significado
τ' :	Tensión tangencial sobre plano de rotura
σ'_n :	Tensión normal efectiva sobre plano de rotura
c :	Cohesión
ϕ :	Ángulo de rozamiento
τ :	Esfuerzo de resistencia al corte
σ :	Esfuerzo normal total
c' :	Cohesión o cementación efectiva
μ :	Presión del agua intersticial o de poros
γ_d =	Peso específico aparente seco
S =	Grado de saturación
n =	Porosidad
γ_w =	Peso específico del agua
LS =	Línea Sísmica.
E =	Ermita.
$\rho(a)$ =	Resistividad aparente
K =	Constante de configuración geométrica del dispositivo Schlumberger
ΔV =	Diferencia de potencial
I =	Intensidad de corriente eléctrica
ν =	Coeficiente de Poisson
V_p =	Velocidad de onda primaria
V_s =	Velocidad de onda secundaria
E_d =	Módulo Estático Dinámico
E =	Módulos Elásticos
δ =	Ángulo de inclinación de las fuerzas externas



Yo, **Luis Mario Almache Sánchez**, autor de la tesis “**Análisis de la Estabilidad actual de La Ermita Sur en la Hidroeléctrica Mazar**”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Magister en Geología Aplicada y Geotecnia. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 10 de septiembre del 2014

Luis Mario Almache Sánchez
C.I: 0103401451



Yo, **Luis Mario Almache Sánchez**, autor de la tesis “**Análisis de la Estabilidad actual de La Ermita Sur en la Hidroeléctrica Mazar**”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 10 de septiembre del 2014

Luis Mario Almache Sánchez
C.I: 0103401451



DEDICATORIA

A Dios por permitirme cumplir cada sueño en mi vida, a mi esposa por ser mi ayuda idónea y una bendición en mi vida, a mis padres y familia por ser mi motivación y mis motores.



AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento más sincero al Dr. Jaime Bojorque por su apoyo y asesoramiento en el presente trabajo.

Al Ing. Julio Robles por su ayuda desinteresada y amable cada ocasión que fue necesaria



CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y ASPECTOS GENERALES

1.1 Introducción y justificación

El Proyecto Hidroeléctrico Mazar es una etapa del Proyecto Paute Integral, y fue concebido con el objetivo de asegurar la vida útil del embalse de Amaluza y por lo tanto la operación de la Central Molino (actualmente en operación). El Proyecto Integral contempla el funcionamiento de la Presas: Mazar, Central Molino, Sopladora y Cardenillo, se proyecta con estas centrales una generación energética anual superior a los 500 GW/h. Con estas obras se aprovechará al máximo el caudal del río Paute.

Dentro del área de construcción del proyecto Mazar, se encuentran deslizamientos que están amenazando el normal funcionamiento de la presa, el movimiento conocido como La Ermita Sur, que es el tema central de investigación, está considerado como uno de los mayor riesgo para el proyecto. Ubicado en la margen derecha de la presa, actualmente es una zona en movimiento, presenta problemas de inestabilidad que han cambiado las condiciones de vulnerabilidad de la presa considerando dos factores: que el probable efecto de un derrumbe repentino una vez que el proyecto entre en funcionamiento ocasionaría la generación de una ola, ya que está ubicada aproximadamente a 250 metros aguas arriba del actual eje de embalse y el hecho de que deslizamientos pequeños producen sedimentos que se van alojando en la presa, lo cual, conforme al paso del tiempo disminuirían el volumen de agua embalsada. Por lo tanto el presente tema de investigación tiene como finalidad dar una alternativa de solución a él o los factores que generan este movimiento.

1.2 Ubicación del área de estudio

El deslizamiento está ubicado al sur – este del Ecuador entre los límites de las provincias del Azuay y Cañar. Localizado en el Cantón Sevilla de Oro (Azuay), se encuentra aproximadamente en el km 105 de la vía Cuenca – Méndez, aproximadamente entre las cotas altitudinales de 2150 msnm (nivel de coronación de la presa) y la 2650 msnm (en la cota 2500 msnm se ubica la carretera Cuenca – Guarumales) [1]. En coordenadas UTM entre los puntos 764 800 Este y 9 712 700 Norte, al margen derecho del río Paute [2].

En la figura 1 se observa el mapa político del Ecuador y la ubicación de la zona en estudio.



Figura 1.- Mapa político del Ecuador y ubicación de la zona en estudio. Imágenes tomadas y adaptadas al presente trabajo del sitio: <http://www.saberia.com/mapasdelmundo/Ecuador>.

En la fotografía 1, se observa la zona del deslizamiento, en una parte del talud ya ha existido movimiento, la zona que queda dentro de la línea amarilla indica material deslizado y zona erosionada.



FOTOGRAFIA 1.- DESLIZAMIENTO LA ERMITA SUR

La línea roja representa la Carretera Cuenca - Guarumales. La Línea entrecortada amarilla representa la zona inestable

1.3 Vías de acceso

1.3.1 Vía Cuenca – Azogues– Mazar

Utilizando la autopista Cuenca – Azogues vía asfaltada de primer orden que tiene una longitud aproximada de 31 km, desde la ciudad de Azogues siguiendo la vía por la margen izquierda del río Paute carretera en un buen estado, casi en su totalidad asfaltada recorriendo los puntos Matrama – Taday – Pindilig – Zhoray – Buenos Aires – Mazar se llega al pie de presa. En el tramo comprendido desde Buenos Aires al proyecto Mazar observando hacia la parte derecha de la vía se tiene una buena visibilidad del deslizamiento La Ermita Sur.

1.3.2 Vía Cuenca – Paute - Mazar

Siguiendo la carretera Cuenca – Paute, vía de primer orden asfaltada con una extensión aproximada de 41 km, se tiene a su vez dos formas de llegar al proyecto: desde Paute al igual que en la opción anterior, siguiendo la margen izquierda del río, tomando la ruta Chicti – Dug Dug – Tomebamba – Guarainag – Taday – Pindilig – Zhoray – Buenos Aires – Mazar se llega al pie de presa. La otra partiendo desde Paute por la margen derecha del río y pasando los cantones Guachapala, El Pan, Sevilla de Oro, San Pablo hasta llegar a la subestación. La figura 1 indica los diferentes proyectos eléctricos en el país y su interconexión vial.

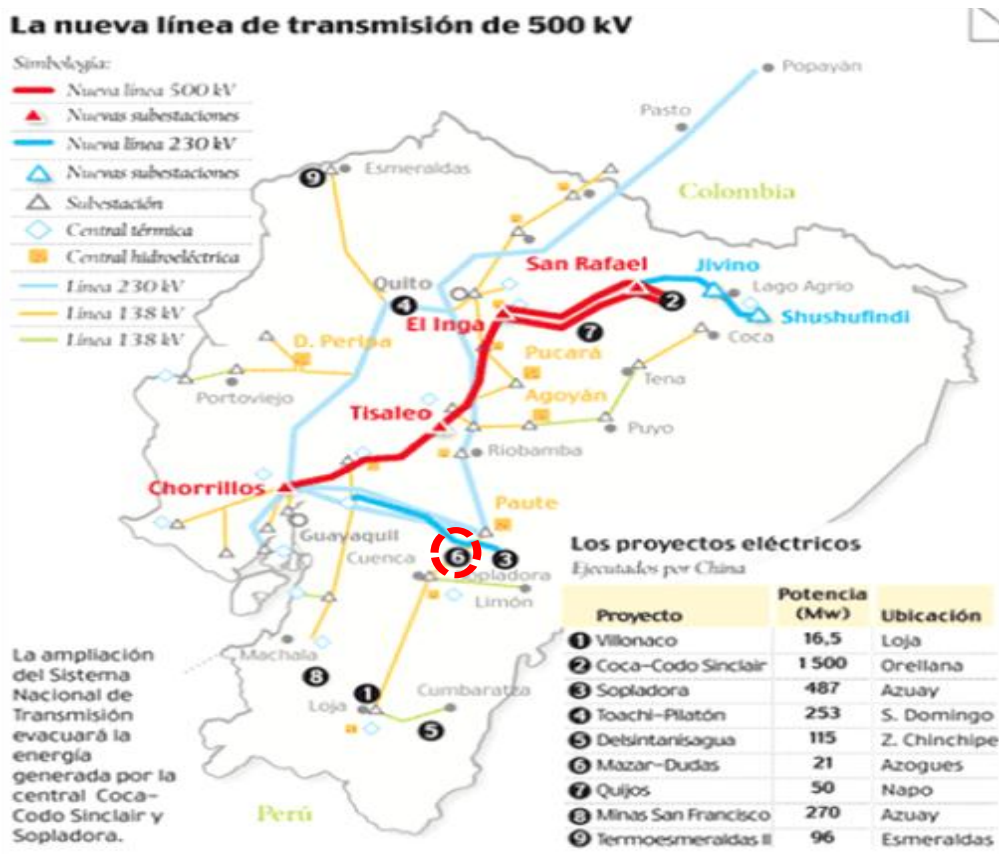


Figura 2.- Vías de acceso a los diferentes proyectos hidroeléctricos dentro del país. Imagen tomada y adaptada al presente estudio del sitio: http://www.elcomercio.com/negocios/Infografía-transmisión-KV-energía-Coca-Codo_ECMIMA20121211_0004_40.gif. (Fecha de actualización: 12 de noviembre del 2013).



1.4 Clima, suelo y vegetación de la zona

La zona donde se desarrolla el proyecto está influenciada por un clima similar al que se observa en la región amazónica. En lo referente a las precipitaciones, la época de menor lluvia se da entre los meses finales e iniciales de cada año, mientras que las más intensas se registran en los meses intermedios [2].

Esta zona tiene una nubosidad constante a lo largo del año, se registran valores de pluviosidad para esta zona entre los 3000 mm/a y 4000 mm/a. La temperatura y la humedad son inversamente proporcionales a la altura, disminuyen en los puntos topográficos más elevados.

En el área de influencia directa del proyecto se presentan variaciones altitudinales que van desde los 2000 msnm hasta los 2800 msnm. En la parte oriental en el sector de San Pablo el clima que predomina es húmedo temperado, mientras que en el extremo oriental en el sector de Chicti se presenta un clima seco subcálido [3].

Las áreas donde se construye la presa, el reservorio y donde se está produciendo el deslizamiento en estudio, están conformadas por taludes escarpados, afloramientos rocosos y presencia mayoritaria de suelos erosionados, estas características han impedido que se den asentamientos poblacionales y que estos suelos sean aptos para la agricultura. En estas zonas la vegetación está constituida de pequeños matorrales y por ende no existe mucha vida silvestre [2].

En las zonas de acceso al proyecto, así como en las márgenes derecha e izquierda del río Paute, los suelos que se localizan son arcillosos, con pendientes pronunciadas lo que no les hace aptos para la ganadería pero con una alta forestación. Los pastizales constituyen en forma general el uso actual del suelo. Se observa en una pequeña cantidad el cultivo de maíz, frejol y tomate de árbol.

De forma general se puede acotar que en la zona de desarrollo del proyecto Mazar, así como en la del deslizamiento La Ermita Sur, se observa la presencia de matorrales altos, matorrales bajos y con abundante presencia de vegetación herbácea.



1.5 Hipótesis

Desde un punto de vista global, las zonas más propensas a la inestabilidad son zonas montañosas, zonas de relieve con procesos erosivos, meteorizadas, laderas de valles fluviales, zonas de materiales sueltos y blandos, zonas con macizos rocosos arcillosos, esquistosos y alterables, zonas sísmicas, etc.

En la Hidroeléctrica Mazar, la geología en el sector de La Ermita Sur, está representada mayormente por dos depósitos de diferente génesis identificados como Coluvial y Roca Metamórfica, compuestos a su vez de material fino (limo arcilloso) y material grueso (gravas de origen metamórfico, esquistos cuarcíticos), estos depósitos se encuentran contemplados dentro de las zonas geológicas inestables, por lo cual, desde este punto de vista este sería el factor predominante para el movimiento.

Desde el punto de vista del equilibrio de fuerzas se produjo un factor desencadenante que rompió este equilibrio produciendo un movimiento, por lo cual valiéndonos de programas para modelación se quiere comprobar que el principal factor desencadenante fueron las condiciones hidrológicas que imperan en la zona, ya que el agua juega un doble papel negativo en la resistencia de los materiales:

- 1.- Al generar presiones intersticiales reduce la resistencia al corte del suelo.
- 2.- Incrementa el peso del terreno por consiguiente aumentan los esfuerzos de corte.

Si en la modelación del deslizamiento, en función de las propiedades resistentes del suelo (que son las que controlan la resistencia al corte de los materiales), variando la profundidad del nivel freático, revisando el porcentaje de agua que se infiltra, al igual que los porcentajes de escorrentía y evapotranspiración, se verifica que el factor de seguridad es menor a la unidad se comprobará la hipótesis propuesta.



1.6 Objetivos planteados

1.6.1 Objetivo general

Analizar la estabilidad del deslizamiento conocido como La Ermita Sur contemplado en el Proyecto Hidroeléctrico Mazar como área de riesgo para la presa, analizando las probables causas del deslizamiento, en base a estos datos conocer el factor de seguridad actual en la zona y recomendar finalmente en función de los resultados del análisis, medidas estabilizadoras según el factor desencadenante asumido como principal que es la hidrología de la zona.

1.6.2 Objetivos específicos

- Analizar los factores que provocan un cambio de equilibrio entre las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras tanto de efecto permanente como de efecto temporal en La Ermita Sur con el fin de determinar él o los factores desencadenantes o en su defecto verificar el asumido en la hipótesis planteada.
- Obtener los datos para la modelación en base a la información hidrogeológica y a los datos obtenidos de la instrumentación.
- Modelar el deslizamiento utilizando un programa especializado de equilibrio límite, determinación de los factores de seguridad en base a la superficie de deslizamiento, coeficientes sísmicos y diferentes niveles freáticos aplicando el método de Morgenstern – Price.
- Modelar el deslizamiento utilizando un programa especializado de elementos finitos, determinación de los factores de seguridad en base a la superficie de deslizamiento, coeficientes sísmicos y diferentes niveles freáticos, por medio del análisis Tenso – Deformacional que se produce en la roca utilizando la reducción del esfuerzo cortante.
- Comparar los resultados entre los métodos de análisis aplicados, verificando la concordancia entre ellos.
- Recomendar medidas estabilizadoras posteriores al análisis de resultados en base al factor desencadenante asumido como el de mayor incidencia para el deslizamiento.

1.7 Metodología

- De las diferentes visitas efectuadas al sitio del deslizamiento, adicional a verificar en el campo los posibles factores desencadenantes, se realizó una recopilación de información que existe sobre la zona de estudio planteada: resultados de ensayos de campo e instrumentación utilizada en la zona estudiada, información hidrológica, información climatológica, resultados de inclinómetros, piezómetros, hitos topográficos, sismica de refracción.
- Con la información obtenida se identificó el tipo de deslizamiento en función del movimiento y su velocidad, permitiendo elegir los posibles métodos de estabilización en base a las características de este movimiento.
- Se analizó las capas actuantes en el deslizamiento y las superficies de falla presentes en el mismo en base a los resultados de perforaciones, monitoreo y geofísica realizada en la zona, de igual manera se generó un perfil del deslizamiento.
- Con el programa especializado Slide 5.0, por el Método de Equilibrio Límite (MEL) se modeló el deslizamiento aplicando retroanálisis¹, que parte de un equilibrio de fuerzas y con los datos disponibles se encontraron parámetros de resistencia al corte de los materiales del medio, analizando los factores de seguridad (FS) obtenidos en base a las diferentes condiciones que se presenten, buscando llegar al FS recomendado para este tipo de taludes en base a la variación de los parámetros, para este método se analizó con un plano de falla asumido.
- Con el programa especializado Phase 2, por el Método de Elementos Finitos (MEL), aplicando el método de reducción del esfuerzo cortante se identificaron zonas de falla que probablemente son por donde se genera el desplazamiento, las mismas comparando con los resultados de Slide se verificaron que la superficie de falla asumida es coincidente. De igual forma se verificó que al subir el nivel freático en el talud se produciría un deslizamiento.
- Finalmente, con los resultados obtenidos de los dos programas, se dio unas alternativas de solución al deslizamiento, recomendaciones y conclusiones del estudio.

¹ Análisis posterior de taludes, retroanálisis (back-analysis) [4] pg. 445.

1.8 Contenido de la tesis

Posterior a este primer capítulo de “Introducción y Aspectos Generales” el presente tema de tesis propone el desarrollo y alcance de los siguientes capítulos:

- ❖ En el capítulo 2: “Geología, Geotecnia y Sísmica de la zona.”, se recopiló la información de estos parámetros, tanto de la zona de estudio como del proyecto. De igual manera se estudió familias de diaclasas que afectan a la estabilidad, el tipo de material que se encuentra en el lugar de investigación así como factores de carácter sísmico utilizados en la modelación del macizo.
- ❖ En el capítulo 3: “Análisis de los factores que influyen a la estabilidad”, en este capítulo se profundizó en los factores de carácter hidrogeológicos que afectan la zona de estudio, infiltración, escurrimiento, evaporación, ya que estos influyen en el equilibrio entre las fuerzas estabilizadoras y las desestabilizadoras, encontrando factores de seguridad (FS) acorde a los cambios de estos. Estos parámetros sirven en la modelación del macizo, en el caso de la infiltración si disminuye la misma aumenta el FS de igual manera si aumenta la evapotranspiración disminuye peso al macizo.
- ❖ En el capítulo 4: “Instrumentación, monitoreo y geofísica de la zona”, se analiza la información de ensayos: geotécnicos, geofísicos, e instrumentación que identifican el tipo de material, nivel freático, presiones de agua, materiales débiles que influyen en el movimiento, distribución de materiales, propiedades físicas de los componentes. Esta información se utiliza en la modelación con el programa Slide 5.0. La instrumentación ayuda a obtener información de movimientos, velocidades y azimut de los hitos topográficos registrados en el talud en determinados parámetros de tiempo. Adicional la información geofísica ayudó a obtener módulos elásticos y coeficientes de Poisson que se utilizaron en la modelación de Phase 2.
- ❖ En el capítulo 5: “Caracterización del movimiento”, en base a la información de los capítulos anteriores se caracterizó al movimiento: forma, volumen de material, velocidades, se correlacionó la información obtenida en las secciones anteriores lo que ayudó a clasificarlo dentro de un tipo de movimiento determinado. Adicional en este capítulo se analizó los niveles freáticos presentes en la zona, se determinó el perfil con el cual se modeló el talud y los criterios de rotura con los cuales se trabajó.

- ❖ En el capítulo 6: “Análisis de la estabilidad y modelización del talud”, se procedió a modelar a la ladera por medio de programas computacionales, en el caso del Slide se utilizó el Método de Equilibrio Límite (GLE/ Morgenstern-Price), conociendo los parámetros que gobiernan la ladera así como su superficie de fallo, se modelo al movimiento y se obtuvo un factor de seguridad en función de estos datos, posteriormente aplicando el retroanálisis se encontró los valores de los parámetros de cohesión y ángulo de fricción cuando la estabilidad se encuentra al límite es decir la unidad. Se modelo el talud considerando efectos sísmicos y finalmente con este programa se varió la profundidad del nivel freático observando la disminución del factor de seguridad confirmando nuestro objetivo de que el nivel de agua afecta de manera directa la estabilidad.

Con el programa Phase 2 se realizó la modelación por medio de la reducción del esfuerzo cortante del talud obteniéndose factores de seguridad en base a las condiciones originales, variaciones de nivel freático y por efectos sísmicos. Adicional este programa dio la opción de verificar desplazamientos laterales a causa del movimiento. Finalmente se comparó los resultados entre los dos programas utilizados.

- ❖ En el capítulo 7 “Conclusiones y recomendaciones”, se presentan las conclusiones del análisis realizado y las recomendaciones de futuras líneas de análisis que se pueden realizar en el talud.



CAPÍTULO II: GEOLOGÍA, GEOTECNIA Y SÍSMICA DE LA ZONA

2.1 Geología y geomorfología del área de investigación

2.1.1 Geomorfología regional

Por su ubicación en la región del Austro, el Proyecto Mazar se encuentra identificado geomorfológicamente por la región de la Sierra Ecuatoriana. La región austral es una depresión interandina, en su mayoría se encuentra rellena de sedimentos detríticos, pertenecientes al Terciario Superior, con intercalaciones volcánicas asentadas sobre rocas cretáceas más antiguas [6].

Dentro de la geomorfología regional una de las características principales es el alineamiento NE-SW de una gran parte de las cadenas montañosas, de los valles y ríos de la zona, esta dirección corresponde a las estructuras tectónicas más importantes de la región Andina al sur del País [5].

Los Andes ecuatorianos en la parte sur tienen como constitución básica a las rocas metamórficas, están intercaladas con magmáticas y cubiertas por material piroclástico, este último material da un relieve suave a las montañas de la zona [7].

En la región en estudio al lado oeste de Guarumales se encuentra granodiorita, ésta es fácilmente meteorizable por lo cual en la zona se presentan suelos arenosos con colores amarillentos y rojizos [7].

De igual manera se encuentra zonas con alta presencia de metamorfitas, estas representan zonas con formas asimétricas y con rocas puntiagudas. En las zonas donde se presentan pendientes más abruptas como es el caso del deslizamiento en estudio, se presentan afloraciones de rocas más resistentes como esquistos, cuarzos, entre otros, estos se observan con mayor facilidad en lugares donde la morfología presenta depresiones [6].

2.1.2 Geología regional

Extendido a lo largo del Ecuador, en uno de los costados de la cordillera Real, se presenta un cinturón de rocas metamórficas provenientes del Jurásico que se les denomina Serie Aloe - Paute, su presencia se observa al lado este de la cuenca sedimentaria. Esta serie está presente de forma notable en la zona del proyecto Hidroeléctrico Mazar [6].

La estratigrafía de la serie se compone de una unidad superior conocida como los “Metavolcánicos de San Francisco” compuesta de andesitas con diferentes grados de metamorfosis (filitas, aglomerados, esquistos micáceos), y la unidad inferior llamada “Esquistos El Pan”, constituidos principalmente de esquistos cuarcíticos, esquistos verdes con intrusiones de granodiorita. Existe también presencia de la formación Yunguilla compuesta de angilitas, areniscas y productos piroclásticos continentales [5].

2.2 Geomorfología local

El río Paute gracias a su fuerte erosión ha contribuido a modelar laderas e incrementar los deslizamientos y movimientos de masas en esta zona del proyecto, es por este y por otros motivos que la Ermita Sur es un deslizamiento activo que se desarrolla en la parte inferior de esta cuenca hidrográfica. Se debe considerar que este es un antiguo deslizamiento cuyo declive se localiza sobre la cota 2550 msnm. [6].

Este deslizamiento se va dando a lo largo de varias superficies de cizallamiento, teniendo que la corona del deslizamiento se encuentra ubicada aproximadamente en la cota 2500 msnm y el pie en la cota 2170 msnm. Esta masa deslizada tiene un espesor aproximado de 70 m y está compuesto de material coluvial en los 30 primeros metros y roca descomprimida en los restantes. En la zona comprendida entre los 2200 y 2320 msnm, se puede apreciar grietas, asentamiento, deslizamientos superficiales y reptaciones a consecuencia de la reactivación de este movimiento [1].

Aguas abajo de la quebrada Ingapata, en la margen derecha del río Paute, en la zona del deslizamiento presenta un relieve de moderado a abrupto, observándose que bajo la cota 2300 msnm las laderas tienen pendientes muy fuertes con inclinaciones que llegan a los 50° y con escarpes hacia el lecho del río. Sobre esta misma cota se observa que la inclinación de las laderas disminuye con pendientes que se encuentran en los 30° y con depósitos intactos de un valle antiguo y amplio. La base del deslizamiento está ubicada a unos 200 m sobre el cauce del río Paute, siendo separados por una ladera que presenta un inclinación promedia de 45° y está conformada por un basamento rocoso [8].

2.3 Geología y estratigrafía del área de investigación.

En base al mapa geológico del proyecto Hidroeléctrico Mazar que se observa en el anexo 1, se establece que el deslizamiento La Ermita tiene como base rocas metamórficas pertenecientes a la unidad Aloe – Paute. Esta tiene tres sub-unidades en el área de influencia del deslizamiento: La Letra, Ingapata y la Ermita, el deslizamiento en si esta sobre esta sub-unidad y se compone de suelo y material coluvial [8]. La estratigrafía identificada en estas unidades es la siguiente:

2.3.1 Deposito coluvial

Se localiza entre la superficie natural del terreno y el contacto con las rocas de la formación La Ermita, caracterizado por presentar en la parte superior un material coluvial fino compuesto mayoritariamente por una matriz limo arcillosa plástica de una coloración entre café y amarilla, con presencia de rocas angulosas metamórficas. Posterior a este tramo el coluvial presente es grueso, caracterizado por bloques angulosos de cuarcitas, metavolcanitas, esquistos cuarcíticos y micáceos, en la superficie estos se presentan oxidados y alterados, con un alto porcentaje de óxido de manganeso y que presenta como matriz un limo arcilloso plástico de color café amarillento [8]. En la fotografía 2 se aprecia el material coluvial presente en la zona perteneciente a la época cuaternaria.



FOTOGRAFIA 2.- DEPOSITO COLUVIAL

Afloramiento de material coluvial presente en el deslizamiento, Coordenadas: UTM: 765 047 E-9 712 751 N.
Fotografía proporcionada por HIDROPAUTE

2.3.2 Sub – unidad La Ermita

Esta unidad se encuentra bajo el material coluvial, se presenta como un macizo rocoso compuesto por cuarcitas, metavolcanitas, esquistos cuarcíticos, cloríticos y micáceos, se observa en sus caras una alta foliación y cizallamiento producto de fuerzas tectónicas. Esta unidad se la puede clasificar en dos capas:

La superior caracterizada por rocas metamórficas muy fracturadas, medianamente alteradas, esto posiblemente originado por pliegues o por descompresión. En la zona inferior se localiza una roca metamórfica con una alteración media y medianamente fracturada [8]. En la fotografía 3 se aprecia un afloramiento perteneciente a la unidad Aloe – Paute.



FOTOGRAFIA 3.- AFLORAMIENTO ROCOSO

Afloramiento rocoso compuesto por cuarcitas presente en el deslizamiento, Coordenadas UTM: 764 921 E – 9 712 542 N.

Fotografía proporcionada por HIDROPAUTE

2.4 Geología estructural

Las rocas metamórficas que afloran en el área tienen como un rasgo estructural dominante la dirección de foliación, presentan una continuidad mayor a 10 m, con superficies planas con ligeras ondulaciones, presentan también micropliegues causados por esfuerzos tectónicos, que también han provocado capas de material incompetente con material competente en su intermedio. Las diaclasas encontradas en la zona se han formado también a causa de esfuerzos tectónicos, presentan superficies planas rugosas superficialmente oxidadas, con un espaciamiento que va de los 15 cm a 50 cm, con una separación aproximada de 3 m entre diaclasa y diaclasa.

La orientación de los sistemas de discontinuidades (Sistema A, B y C), fueron proporcionados por HIDROPAUTE [8], los mismos se muestran en la tabla 1 y tienen las siguientes direcciones preferenciales de buzamiento y ángulo de buzamiento:

DESCRIPCION	DIR. BUZAMIENTO / ANG. BUZAMIENTO
SISTEMA A	260° / 75°
SISTEMA B	075° / 80°
SISTEMA C	345° / 70°

Tabla 1.- Orientación de los sistemas de discontinuidades A, B, C identificados en la zona de estudio.

De la recopilación obtenida de INECCEL, Diseños Definitivos, del capítulo de Geología y Geotecnia, (1998), la información que se tiene es la siguiente [6]:

“La esquistosidad tiene una orientación diagonal a la pendiente con buzamiento hacia el interior. La combinación de dos familias de discontinuidades (3° / 54° y 219° / 90°), da origen a una cuña con arista inclinada 38° respecto a la horizontal. Adicionalmente una familia (70°/55°), puede favorecer el volcamiento y la posibilidad de inestabilidad de cuñas que afectarían el horizonte descomprimido en las orientaciones preferenciales del talud natural, rumbo NS a N10°E”. Esta información se encuentra en la tabla 2.

DESCRIPCION	DIR. BUZAMIENTO / ANG. BUZAMIENTO
SISTEMA D	3° / 54°
SISTEMA E	219° / 90°
SISTEMA F	70° / 55°

Tabla 2.- Orientación de los sistemas de discontinuidades D, E, F, encontrados en la zona de estudio recopilados de INECCEL.

En base a los datos anteriores, se realizó la representación estereográfica de los sistemas de discontinuidades presentes en la zona y se puede observar en el gráfico 1 identificándose la orientación y distribución de las familias presentes en el talud. En el gráfico de la izquierda se observa el diagrama de círculos máximos con sus polos respectivos, en el gráfico de la derecha se observa el diagrama de la densidad de polos. Los sistemas de discontinuidades A, B y C, por su dirección y buzamiento no son de mayor riesgo para la estabilidad del talud, no así las discontinuidades D, E, F que provocaría una volcamiento en cuña y que por su orientación afectaría al embalse.

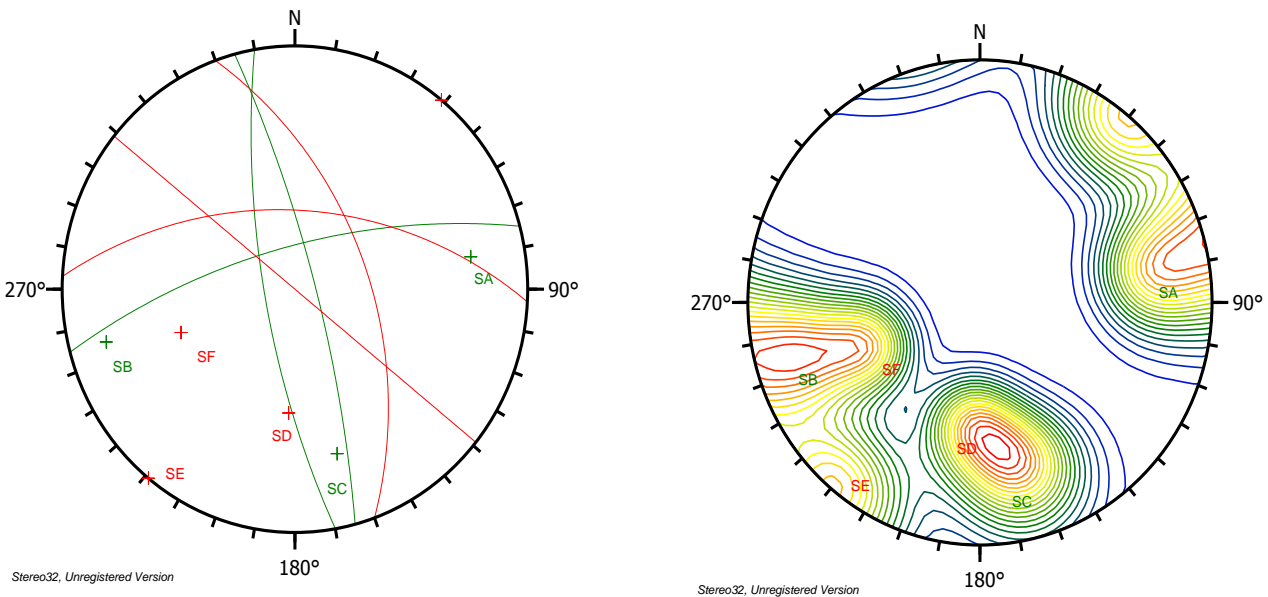


Gráfico 1.- Representación estereográfica de las familias de discontinuidades en la zona de estudio en diferentes periodos de investigación. Gráficos realizados en base a la información proporcionada por HIDROPAUTE.

2.5 Sísmica de la zona

Por su ubicación, nuestro país se encuentra en un proceso de subducción fruto de la convergencia de placas, por una parte la de Nazca que se forma a partir de la cordillera submarina del Pacífico Oriental que es empujada hacia el Este; por otra parte, la Sudamericana que se crea en la cordillera centro-oceánica submarina del Atlántico medio y es empujada hacia el Oeste. La convergencia de estas placas frente a las costas de Sudamérica produce un choque de las mismas, dando origen al proceso de subducción de la placa oceánica bajo la continental, esto a generado que Ecuador sea catalogado como una zona de alta incidencia sísmica [6].



Para el proyecto Mazar se realizó diferentes estudios hasta llegar a los diseños definitivos, de estos, el resumen del riesgo sísmico es el siguiente[6] :

“La sismicidad histórica de la región cercana al proyecto muestra que la cuenca media del río Paute ha experimentado intensidades del orden de 7 grados en la escala MKS², producida fundamentalmente por sismos de magnitud Ms³>7, localizados en la placa Nazca a profundidades de alrededor de 100 km bajo la zona del proyecto”. [6].

Otras fuentes que han aportado a la estadística de intensidades en el sitio del proyecto son la Zona Subandina y la Subducción Sur, con intensidades de alrededor de 6, aunque menos frecuentes que la placa Nazca. Ni la Subducción Norte, ni las fallas de rumbo del límite oriental del Bloque Norandino han generado intensidades mayores que 6 en el sitio del proyecto.

La sismicidad instrumental de la Red Nacional de Sismógrafos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, destaca como el evento más importante de la zona, en 10 años de registros, al terremoto de Macas de 1995, ubicado a 80 km al Este de la zona de emplazamiento de obras, con Ms = 6,9 y con su nube de réplicas. Fue localizado en la zona Subandina, pero con perturbación general en la región, tanto que algunas de sus réplicas en el rango de magnitud de 3 a 5, se ubicaron en las inmediaciones de la zona del proyecto”. [6].

Del estudio realizado por INECEL en 1998 para la zona de Mazar, se estableció como un factor de aceleración sísmica igual 0,275 g para un período de retorno de 1000 años , posteriormente, el que se recomendó para la zona en estudio fue de 0,24 g [6]. Este valor es el adoptado para la modelación en la presente investigación.

En función de las visitas efectuadas a la zona de estudio, la información obtenida del campo versus la recopilada tienen concordancia por lo cual se adoptó esta última para el presente trabajo.

² Escala Medvedev-Sponheuer-Karnik, es una escala de intensidad macrosísmica usada para evaluar la fuerza de los movimientos de tierra basados en los efectos destructivos, tiene 12 grados.

³ Magnitud de Ondas Superficiales.



CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ESTABILIDAD

3.1 Introducción

Se parte del concepto que todos los suelos que presentan pendientes tienen una tendencia al movimiento, en diferentes grados de velocidad y con magnitudes también variables; los diferentes procesos geodinámicos que intervienen en la superficie terrestre dan vida a estos movimientos, los más comunes son los de laderas [9].

Dentro del medio geológico, factores como la gravedad, la meteorización que provoca el debilitamiento de los materiales con el paso del tiempo, y varios fenómenos ambientales y naturales han logrado que estos procesos sean riesgos geológicos en potencia que han cobrado vidas humanas e incuantificables costos económicos [9].

La morfología y el relieve de las laderas dependen directamente del clima y los procesos geológicos, por lo general estas adoptan pendientes naturales cercanas a un punto de equilibrio, cuando ocurre un cambio en las condiciones en las que se logra esta estabilidad, adquieren una nueva morfología hasta volver nuevamente a un punto equilibrante. Zonas como las montañosas y escarpadas, con procesos erosivos y de meteorización intensa, zonas con macizos rocosos arcillosos, con materiales blandos y sueltos, que presenten esquistosidad, con alto riesgo sísmico, con altos valores de pluviosidad, laderas de valles fluviales entre otras, son las más propensas a la inestabilidad, y a su vez producen los deslizamientos que son los término que comúnmente se utiliza para identificar a los movimientos en laderas, estos se deben al desequilibrio entre las fuerzas internas y externas que se producen en el terreno; es decir que las fuerzas desestabilizadoras superan a las estabilizadoras o resistentes, esto puede ser causado por un aumento de las fuerzas estáticas o dinámicas en la zona [9].

El movimiento de laderas está controlado por factores que son capaces de modificar tanto las fuerzas internas como las externas en un terreno. Son factores condicionantes (pasivos) los geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos, estos factores dependen de la propia naturaleza. Son desencadenantes (activos) todas las fuerzas externas sean estas temporales o fijas que actúan sobre el suelo, con frecuencia se atribuyen a factores como lluvias, terremotos, explosiones entre otros. La geometría del terreno (altura e inclinación) y la geología controlan la posibilidad de rotura y los modelos de inestabilidad [9].

En los cuadros anexos 2, 3 y 4 se puede apreciar cómo actúan, cuales son, la influencia y efectos de los diferentes factores para la estabilidad de una ladera.

3.2 Hidrología de la zona

De la recopilación realizada, se puede resaltar lo siguiente referente a la hidrogeología que predomina en la zona [2]:

“El drenaje es poco desarrollado y de corto recorrido con un pequeño caudal permanente que aflora en vertientes ubicadas entre los 2 150 y 2 250 m en la base del deslizamiento.

En el extremo meridional del área inestable se encuentra el drenaje principal del deslizamiento, se trata de dos cauces secos que confluyen en el punto de coordenadas 764 767 Este y 9 712 595 Norte a la cota 2 160 msnm. El ramal más septentrional consiste de un cauce cubierto de vegetación con un lecho constituido por material detrítico anguloso con escasa matriz. El cauce es bien conformado desde la cota 2370 msnm, lugar en el que aparece en medio de una pequeña cárcava. La configuración y morfología de este cauce indican que se trata de un drenaje intermitente en el cual se produce una circulación de la escorrentía solamente durante lluvias torrenciales. En el punto de coordenadas 764 855 Este y 9 712 557 Norte en la cota 2 270 existe una pequeña vertiente que brota a lo largo de todo el año, en suelos limo arenosos y nuevamente se infiltra luego de un corto recorrido. La escorrentía se concentra y aparece firmemente recién a la cota 2 170 indicando con esto que casi todo el drenaje se produce por infiltración. ”

En el anexo 5 se observa la precipitación media anual en milímetros que se tiene en la zona, la evapotranspiración potencial, el escurrimiento y la infiltración que se registra, tanto en la media mensual como la anual en la ladera La Ermita Sur [2], esta información se utiliza para la interpretación de lecturas de la instrumentación que se tiene en el talud y la modelización del mismo.

3.3 Factores hidrogeológicos

Dentro de los factores que desencadenan el movimiento en las laderas uno muy importante tiene relación con el comportamiento hidrogeológico, el mismo que está asociado con sus características estructurales y litológicas, y su grado de alteración y meteorización. En zonas de altos registros de lluvias, se observan sobre estratos rocosos alta presencia de materiales alterados y meteorizados, además elevados niveles freáticos que influyen en la estabilidad [9].

Se debe considerar que el agua tiene un doble papel negativo en la estabilidad, influye en la resistencia de los materiales de la siguiente manera:

- Reduce los parámetros de resistencias en diferentes tipos de suelos, al aumentar las presiones intersticiales reduce la resistencia al corte.
- Aumenta el peso del terreno y la generación de fuerzas desestabilizadoras en grietas y discontinuidades, lo que incrementa los esfuerzos de corte.

Las precipitaciones y las diversas condiciones climáticas condicionan al movimiento de laderas, el terreno presenta diferentes comportamientos ante precipitaciones intensas, el agua altera los estados tensionales por las presiones que ejerce (intersticial y aumento de peso), produce erosión interna y externa, cambios mineralógicos, todo esto modifica las propiedades y resistencia de los suelos. De igual forma, las precipitaciones al infiltrarse producen flujos subterráneos en las laderas, aumentando la zona saturada e incrementando el nivel freático. Esta cantidad de agua va a depender de factores como la vegetación de la zona, intensidad y duración de las lluvias, tamaño de aporte de la cuenca, del tipo de terreno su permeabilidad, su topografía, el nivel freático inicial entre otros que deben ser estudiados cuidadosamente al realizar un estudio para la estabilidad de laderas [4].

En el gráfico 2 se observa el promedio de pluviosidad mensual registrada en la zona, siendo los meses picos los de mayor precipitación.

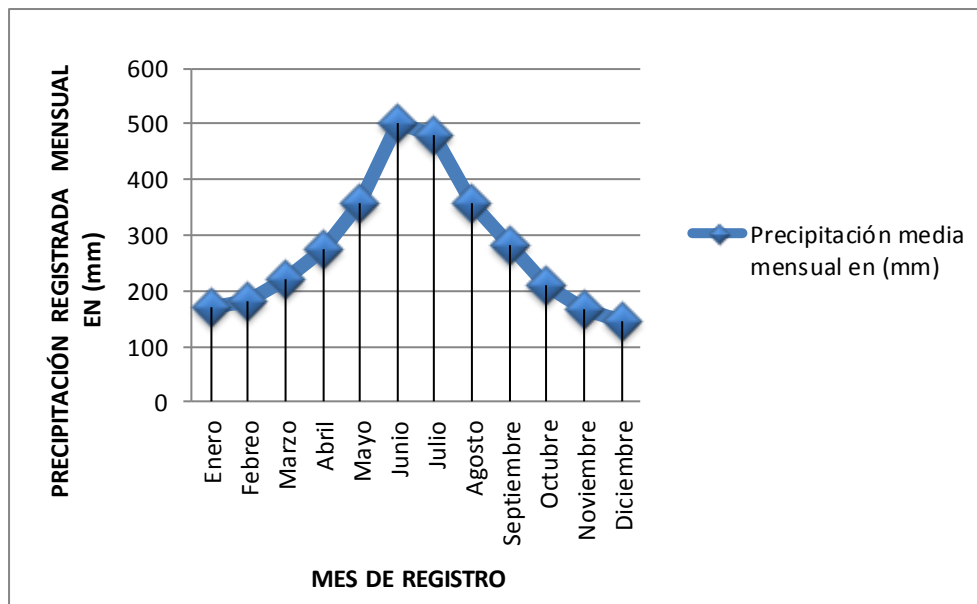


Gráfico 2.- Precipitación media mensual que se registra en La Ermita Sur, el valor pico se registra en el mes de junio. Datos proporcionados por HIDROPAUTE [2], gráfico realizado en función de información recopilada.

Los cuatro componentes principales del ciclo hidrológico que afectan a una ladera son [9]:

- a.- Infiltración.
- b.- Evapotranspiración.
- c.- Esguerrimiento directo.
- d.- Interceptación y/o Encharcamiento.

En la presente investigación la información recopilada corresponde a los 3 primeros componentes, razón por la cual no se estudia la interceptación que se produce en La Ermita Sur. En base a la hipótesis planteada los valores de infiltración regirán la estabilidad de la ladera en estudio, a mayor porcentaje de agua que ingrese en el talud disminuirá el factor de seguridad.

3.3.1 Infiltración

En el estudio de derrumbes inducidos por lluvia, la infiltración es la consideración más importante. Esto es debido a que la infiltración causa cambios en el nivel de la saturación y presiones del agua en el suelo. Este cambio del contenido en agua del suelo afecta la presión efectiva, y por lo tanto también la resistencia al corte del suelo. La infiltración es la cantidad de agua que penetra dentro del suelo. Para una localización espacial dada el índice de la infiltración (velocidad con la cual el agua ingresa al suelo) cambia sistemáticamente con el tiempo y nivel de saturación del suelo. El índice o grado de infiltración afecta principalmente en:

- Disminución de la presión efectiva y a su vez la resistencia al esfuerzo cortante del suelo (τ), mismo que en función de las tensiones efectivas expuesta por Mohr – Coulomb se expresa:

$$\tau' = c + \sigma'_n \tan \phi \quad [10]$$

De donde:

- τ' : Tensión tangencial sobre plano de rotura
- σ'_n : Tensión normal efectiva sobre plano de rotura
- c : Cohesión
- ϕ : Ángulo de rozamiento

En el gráfico 3 se muestra la ecuación de Mohr Coulomb, utilizada para definir la resistencia al corte de suelos y rocas en diferentes casos de tensión efectiva.

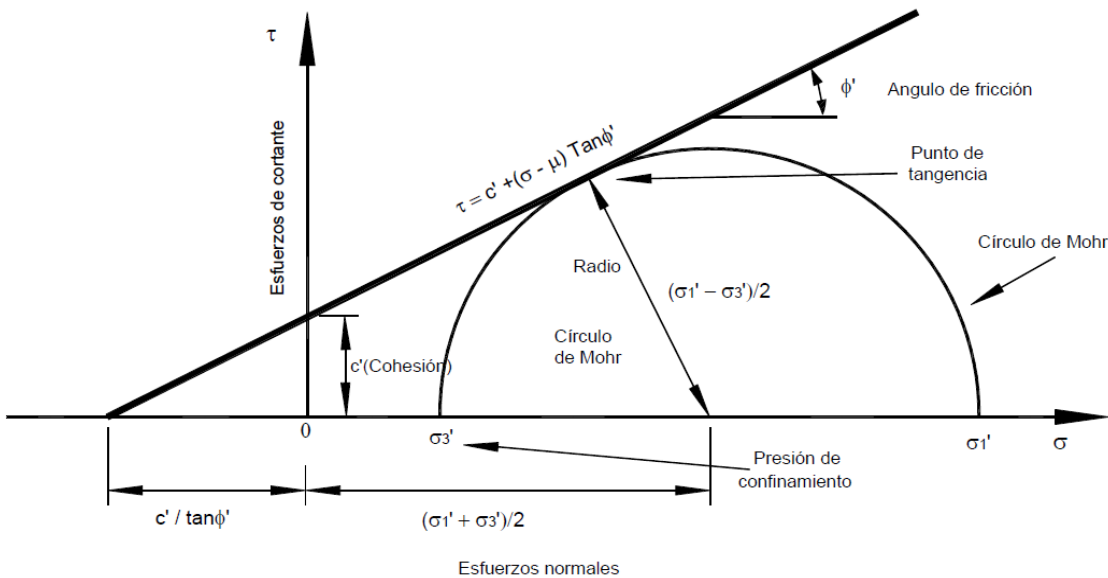


Gráfico 3.- Representación gráfica de la ecuación de Coulomb para suelos saturados. Imagen tomada y adaptada del libro: Deslizamientos, Análisis Geotécnico de Jaime Suarez página 75.

Para suelos saturados, la falla al cortante está expresado por:

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \phi' \quad [11]$$

De donde:

τ : Esfuerzo de resistencia al corte

σ : Esfuerzo normal total

c' : Cohesión o cementación efectiva

μ : Presión del agua intersticial o de poros

En la fórmula anterior, se observa que [11]:

“La presencia del agua reduce el valor de la resistencia del suelo que depende de las presiones internas o de poros de acuerdo con la ecuación de Coulomb, en la cual el factor μ está restando el valor de la presión normal total”.

En el gráfico 4 se observa el porcentaje de agua lluvia que se infiltra en la zona La Ermita Sur en función de la precipitación mensual registrada. El porcentaje de infiltración fue determinado por HIDROPAUTE utilizando el modelo de Green y Ampt, que describe la infiltración de agua en un suelo bajo condiciones de encharcamiento permanente, pero no es el tema de la presente investigación por lo cual no profundizamos en el procedimiento sino en los resultados.

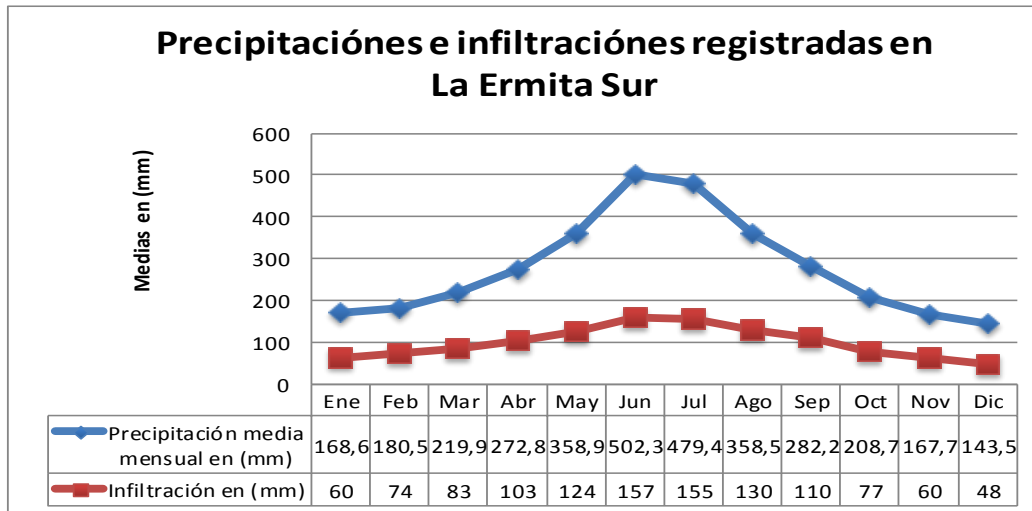


Gráfico 4.- Precipitaciones e infiltraciones medias mensuales que se registran en La Ermita Sur, los valores pico se registran en junio. Datos proporcionados por HIDROPAUTE [2], gráfico realizado en función de información recopilada.

- Alteración del peso específico del material Υ .

El cambio del peso específico se da por saturación del material, esto es:

$$\Upsilon = \Upsilon_d + S n \Upsilon_w \quad [4]$$

De donde:

Υ_d = Peso específico aparente seco

S = Grado de saturación

n = Porosidad

Υ_w = Peso específico del agua

- Erosión interna del material por el flujo subterráneo.
- Cambios en la composición mineralógica de los materiales.

3.3.2 Evapotranspiración

La evapotranspiración es similar a la evaporación y es un proceso mediante el cual el agua de las precipitaciones regresa a la atmósfera. La misma es reincorporada por la transpiración de suelos y de las plantas. La evaporación varía por una parte con la luminosidad, con el viento, la humedad relativa y la temperatura, así como también con el grado de humedad presente [9]. La influencia de los factores atmosféricos o características climáticas propias de la región son importantes, ya que mientras mayor sean las horas-luz, mayor será la evaporación; igualmente se comporta el viento que al ser más intenso y seco, consume mayor cantidad de agua. La evaporación será mayor mientras mayor sea la humedad relativa y menor el número de plantas, a mayor cantidad de evapotranspiración disminuye la infiltración y por ende aumenta el factor de seguridad en una ladera.

El gráfico 5 indica el porcentaje de agua que por evapotranspiración regresa a la atmósfera mes a mes en función de la precipitación, este factor tiene relación directa con la vegetación de la zona.

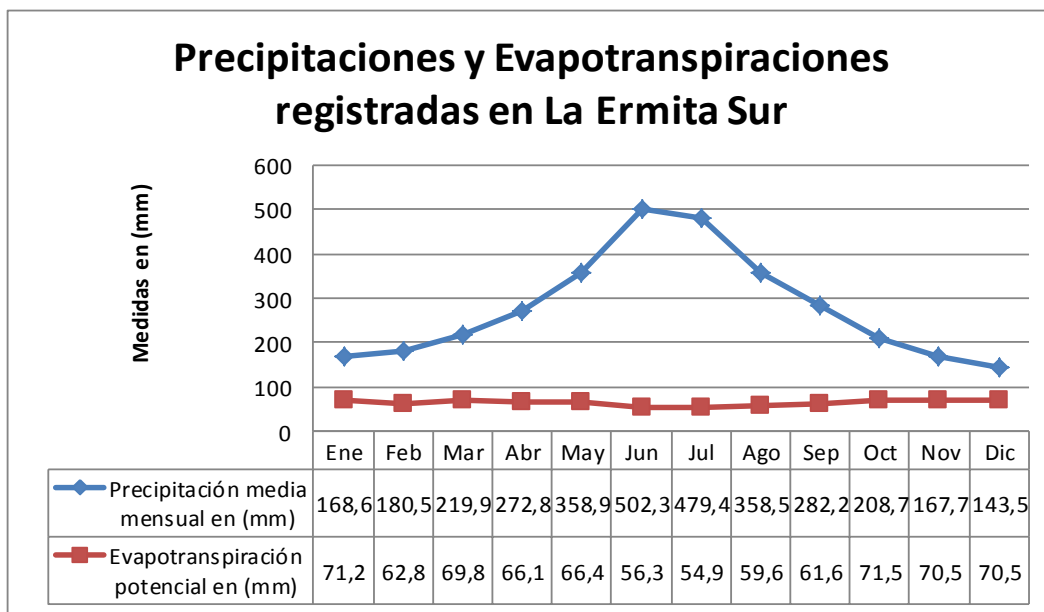


Gráfico 5.- Precipitaciones y evapotranspiraciones medias mensuales que se registran en La Ermita Sur, los valores pico se registran en los últimos meses del año, esto debido a que son los meses con mayor humedad en el ambiente. Datos proporcionados por HIDROPAUTE [2], gráfico realizado en función de información recopilada.

3.3.3 Esgurrimiento

El término esgurrimiento hace referencia al volumen de las precipitaciones que caen sobre una cuenca, menos la retención superficial y la infiltración. El esgurrimiento superficial o directo es función de la intensidad de la precipitación y de la permeabilidad de la superficie del suelo, de la duración de la precipitación, del tipo de vegetación, de la extensión de la cuenca hidrográfica considerada, de la profundidad del nivel freático y de la pendiente de la superficie del suelo [9].

Cuando a lo largo de una precipitación, el poder de intercepción y de almacenamiento en la superficie del suelo han sido ya agotados, y cuando la precipitación es tal que su intensidad excede la capacidad de infiltración del suelo, comienza ya el esgurrimiento superficial propiamente dicho. Desde ese momento, la superficie del talud se cubre con una fina película de agua llamada película de retención superficial. Una vez que el agua corre sobre la superficie del suelo y alcanza los cauces de la red hidrográfica, comienza a aparecer el esgurrimiento superficial [9].

En el gráfico 6 se observa las precipitaciones registradas mes a mes y el porcentaje de agua que se esgurre de estas precipitaciones en la zona. El esgurrimiento tiene relación directa con la erosión presente en la zona de estudio y por ende con la infiltración.

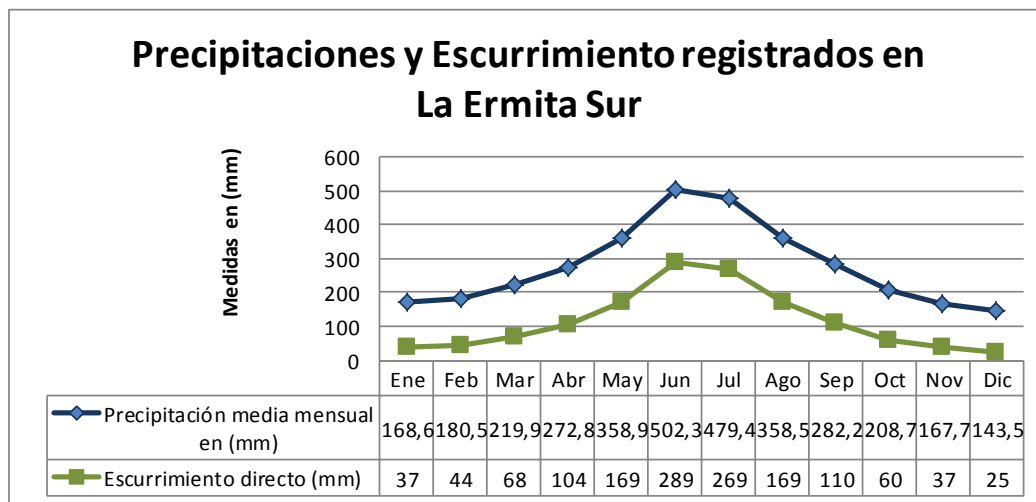


Gráfico 6.- Precipitaciones y esgurrimiento directo promedios mensuales, que se registran en la Ermita Sur, los valores pico se sitúan en los meses intermedios del año, debido a que son los meses con mayor intensidad de lluvias en la zona. Datos proporcionados por HIDROPAUTE [2], gráfico realizado en función de información recopilada.

Del análisis de los gráficos anteriores y la información recopilada de estos componentes en el ciclo hidrológico, analizando los porcentajes correspondientes a cada componente, anexo 5, se concluye que al aumentar la evapotranspiración por medio del incremento de la vegetación disminuye la infiltración y a su vez sus consecuencias en La Ermita Sur.

En la fotografía 4 se observa el camino por el cual agua procedente de la corona del talud a causa de la lluvia, se escurre y a la vez produce infiltración en la zona afectando su estabilidad.



FOTOGRAFIA 4.- ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

Escorrimento presente en el deslizamiento, Coordenadas:
UTM: 764 698 E-9 712 609 N. Fotografía proporcionada por
HIDROPAUTE.

3.4 Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad que tienen las rocas y suelos de permitir el ingreso de fluidos en ellas, un material es *permeable* si deja pasar a través de él una cantidad considerable de fluido en un tiempo determinado, es *impermeable* si la cantidad de fluido es mínima [9]. Para calcular la permeabilidad se realizan ensayos en el campo, los resultados de los tipos de pruebas realizados en La Ermita Sur y proporcionados para la presente investigación son los siguientes:

3.4.1 Ensayos en coluviones

De la recopilación realizada se obtuvo que para los coluviones presentes en la zona, estos están compuestos de materiales gruesos y finos, los primeros presentaron un rango de permeabilidad que está entre (1×10^{-7} m/s a 1×10^{-4} m/s), mientras que los finos se comportan más impermeablemente teniendo una rango entre (1×10^{-10} m/s a 1×10^{-8} m/s), por esta razón en el caso de lluvias el agua drena más fácilmente. La consolidación que presentan es baja por lo cual en la parte superior del deslizamiento se ha producido una erosión a causa del agua que circula desde la corona, provocando surcos y cárcavas que contribuyen a la desestabilidad de la ladera [3].

Los ensayos realizados en estos materiales son Lefranc, que son ensayos de permeabilidad, "in situ" que se aplica con mayor frecuencia. Consiste en introducir o bombear agua desde un sondaje, donde la cavidad es mantenida constante a una determinada profundidad. Se aplica principalmente a suelos sueltos [11].

3.4.2 Ensayos en el macizo rocoso “Unidad La Ermita”

Esta unidad está localizada posterior al Coluvión, para este material los ensayos realizados son Lugeon, los mismos indican que la permeabilidad de la roca disminuye con la profundidad, teniendo rangos entre 100 uL a 10 uL (1×10^{-5} m/s a 1×10^{-6} m/s) en el horizonte muy fracturado a fracturado, llegando a la roca sana casi impermeable presentando rangos en el orden de 10 uL a 0 uL ($< 10^{-6}$ m/s). Estos ensayos también permiten saber que en el interior de las rocas se presentan zonas fracturadas o falladas por lo cual los valores de permeabilidad aumente entre 20 uL y 30 uL (2 a 3×10^{-6} m/s) [11].

El ensayo Lugeon consiste en inyectar agua a presión en las diferentes perforaciones realizadas en el macizo con el objetivo de conocer la permeabilidad de la roca, obteniendo valores más altos en zonas con material cementante fácilmente lavable o zonas fisuradas. Una Unidad Lugeon (uL) corresponde a una absorción de 1 litro de agua por minuto, por metro de sondeo, la presión de inyección es de 10 kg/cm², este se utiliza principalmente en rocas [4].



CAPÍTULO VI: INSTRUMENTACIÓN, MONITOREO Y GEOFÍSICA DE LA ZONA

4.1 Introducción

Las investigaciones *in situ* que se realizan en una obra tienen como objetivo principal el conocer los problemas geológicos – geotécnicos que se pueden presentar en un determinado proyecto, de los resultados de las mismas se obtienen los parámetros y las propiedades que gobiernan a los suelos y las rocas [4].

Una de estas investigaciones son los sondeos geotécnicos, están caracterizados por perforaciones de diámetro pequeño y una mayor facilidad de desplazamiento de la maquinaria necesaria para los mismos. Estas pruebas pueden alcanzar hasta profundidades de 150 m sin equipo pesado, permitiendo atravesar todo tipo de estratigrafía y obteniendo la recuperación de testigos que permiten observar detalladamente como se encuentra interiormente la formación geológica de una zona determinada [4].

Adicional permite la colocación de instrumentos como inclinómetros, piezómetros, extensómetros, control topográfico entre otros, para un monitoreo constante de lo que sucede en una determinada zona, es así que en La Ermita se han realizado varias perforaciones en diferentes épocas de las cuales se ha obtenido registros de movimiento del material y se ha podido determinar zonas de nivel freático, la información recopilada a la que se tuvo acceso en el presente trabajo fue desde el año 2005 hasta el año 2012, el detalle de su ubicación se lo aprecia en los anexos 6 y 7.

Otro de los métodos utilizados para conocer el interior de un talud es la prospección geofísica, cuyo fundamento es la variación de los parámetros físicos significativos correlacionándolo con la geología de la zona. En el presente estudio se analiza los datos de: perforaciones realizadas, inclinómetros, piezómetros, hitos topográfico, geofísica ejecutada, la información de los mismos se encuentran en los anexos del 6 al 10.

4.2 Perforaciones

En la zona se han realizado las siguientes perforaciones en un periodo de tiempo comprendido desde el año 2005 hasta el 2008, de este lapso se recopiló información de 14 perforaciones tanto de investigación como de monitoreo, sus datos se indican en el anexo 6 mientras que en el anexo 7 se puede observar el mapa con la ubicación de las mismas. Las perforaciones no guardan un orden secuencial, por lo cual en la presente investigación se utilizó el nombre con el cual HIDROPAUTE los identifica. Los datos de estas perforaciones se observa en el anexo 6. La ubicación en el anexo 7.

4.2.1 Perforación PE-1

De las muestras recuperadas se determinó un espesor del material coluvial de 16 m, la roca se presenta alterada y fragmentada en tres franjas localizadas entre las cotas: 2289,7 a la 2284,5; 2278,1 a la 2275,6; y entre las cotas 2269,9 y la 2259,6. De igual manera zonas de cizallamiento se muestran en forma de estrías en los testigos recuperados. En esta perforación se colocó un piezómetro. Se localizó el nivel freático a una profundidad aproximada de 38 m [2].

4.2.2 Perforación PE-2

Se determinó un espesor de material coluvial de aproximadamente 29 m, al igual que en la perforación anterior se observan tramos de roca fragmentada con alteraciones entre las siguientes cotas: 2332,1 y la 2326,7; 2280,7 y la 2279, 7. En esta última cota se identifica la presencia de nivel freático. También se observan estrías producto de cizallamiento.

En esta perforación se colocó un inclinómetro, cuyo registro de deformación acumulada hasta diciembre del 2005 fue de 140 mm en 151 días de monitoreo, esto representa una velocidad promedio de desplazamientos de 2.78 cm/mes. Este inclinómetro ya se encuentra fuera de servicio pero de la información obtenida se localiza un plano de rotura principal a la profundidad de 52 m [2].

4.2.3 Perforación PE-3

La capa de material coluvial se localiza hasta los 19 m de profundidad, se encuentra roca alterada y fragmentada están entre las siguientes cotas: 2275,5 y la 2271,3; 2267,9 y la 2258,5; 2255,9 y la 2244,9; 2239,1 y la 2237,5; 2232,9 y la 2230,5; y las cotas 2212,9 y la cota 2208,9 teniendo en esta última presencia de nivel freático. En las cotas señaladas se observó en los testigos estrías por cizallamiento. En esta se colocó un inclinómetro el mismo que registro una deformación acumulada hasta junio del 2007 de 247 mm en 665 días de monitoreo, esto representa una velocidad promedio de los desplazamientos de 1,13 cm/mes. Salió de servicio a partir del 23 de junio del 2007 y el plano de rotura localizado se ubicó a los 17 m de profundidad [2].

En el gráfico 7 se observa un perfil longitudinal realizado en la Ermita Sur, en el mismo por medio de los piezómetros PE – 1 y PE – 2 se aprecia el nivel freático existente en la zona.

En el gráfico 8 se observa un perfil transversal, el mismo se localiza en la parte media del talud en estudio, se puede observar la proyección de las perforaciones PE – 3 y PE – 1, visualizando el contacto entre estratos y el nivel freático en la zona.

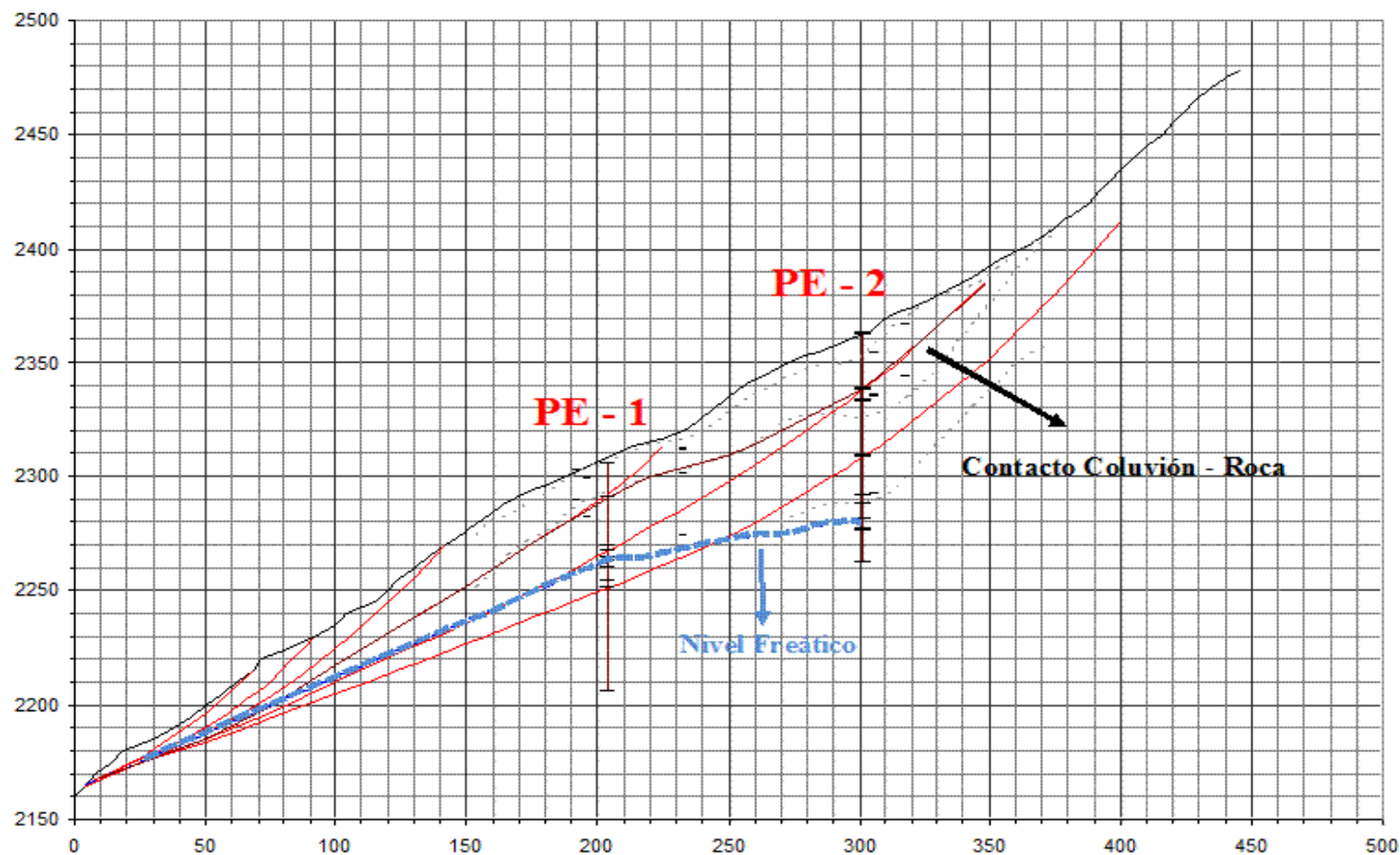


Gráfico 7.- Perfil longitudinal en el deslizamiento La Ermita, las superficies de deslizamiento se representan con datos de las perforaciones P-E1 y P-E2, la línea de segmentos azul marca el nivel freático entre las dos perforaciones. El contacto coluvión - roca es la línea continua [13]. Datos proporcionados por HIDROPAUTE. Gráfico realizado y adaptado en función de información proporcionada.

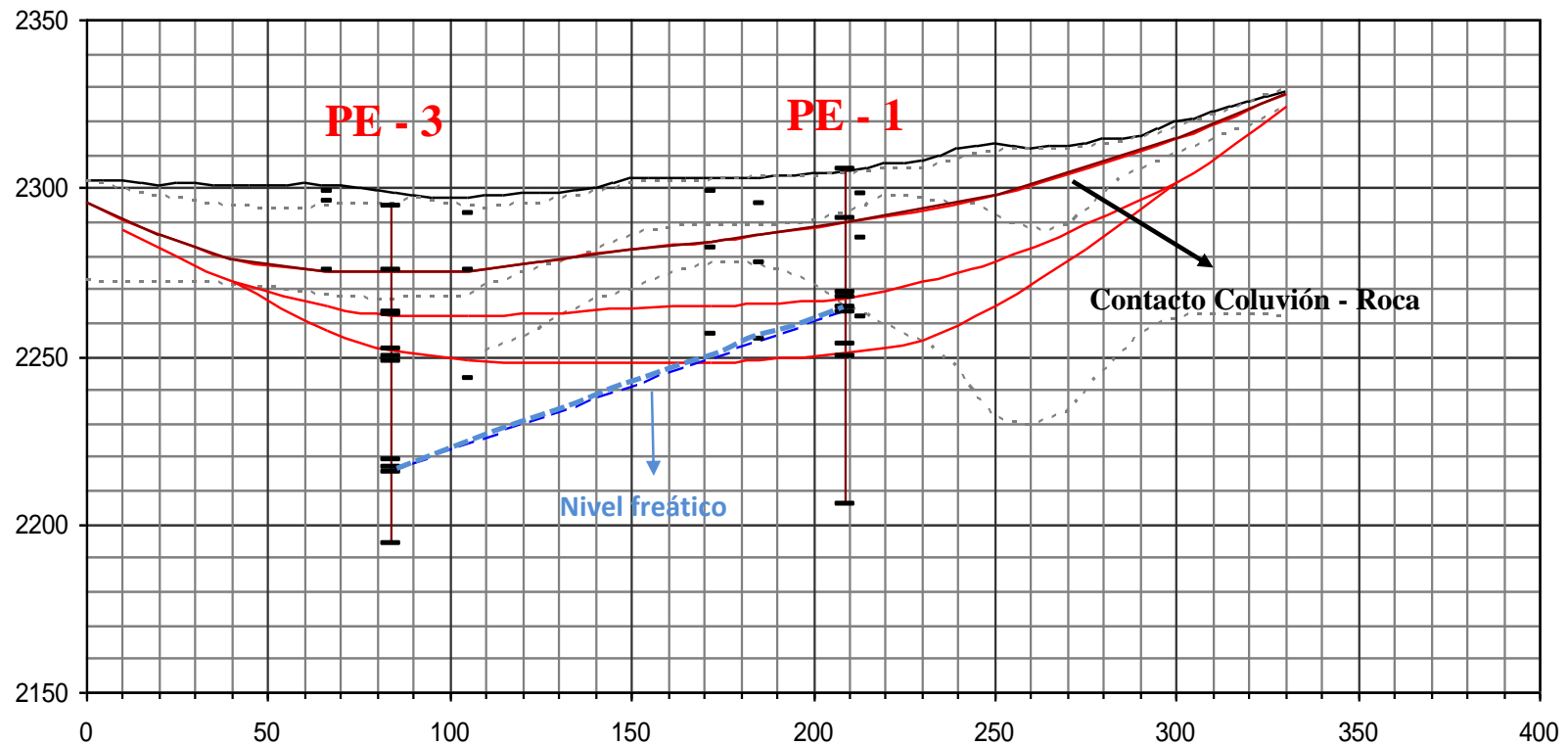


Gráfico 8.- Perfil transversal localizado en la parte media el deslizamiento La Ermita, visto hacia aguas abajo, la línea de segmentos representa el nivel freático entre las dos perforaciones. El contacto entre el material coluvial y la formación rocosa coinciden con la superficie de deslizamiento superior [13]. Datos proporcionados por HIDROPAUTE. Gráfico realizado y adaptado en función de información proporcionada.

4.2.4 Perforación PE-4

Presento un espesor coluvial de 12 m, la roca fragmentada se localiza a lo largo de la perforación disminuyendo la misma a partir de los 62 m de profundidad, de igual manera el cizallamiento se localizan a lo largo de la perforación. En esta perforación se colocó un piezómetro [2]. Las fotografías 5, 6, 7 y 8 son los registros de la recuperación de testigos realizada en la zona, los mismos son a diferentes cotas y muestran la calidad de la roca.



FOTOGRAFIAS 5 y 6.- RECUPERACION DE TESTIGOS EN PERFORACIONES

Fotografías de los testigos recuperados del sondeo PE - 4 a diferentes profundidades, donde se aprecia el registro geológico del material coluvial y la roca fragmentada . Fotografías proporcionada por HIDROPAUTE.



FOTOGRAFIAS 7 y 8.- RECUPERACION DE TESTIGOS EN PERFORACIONES

Fotografías de los testigos recuperados del sondeo PE - 4 a diferentes profundidades, donde se aprecia el registro geológico el Esquistos Cuarzo - Clorítico alterado y fragmentado . Fotografías proporcionada por HIDROPAUTE.

4.2.5 Perforación PE-8

Se colocó un inclinómetro en esta perforación, este fue colocado en mayo del 2007, registrando una deformación acumulada hasta junio del 2007 de 54 mm en 30 días de monitoreo, representando una velocidad promedio superficial de 5,40 cm/mes. De los registros de movimientos se aprecian a los 62 m un plano de rotura.

A la profundidad de 21 m se localiza el contacto entre el coluvión y la roca, y hasta una profundidad de 65 m se localiza roca fragmentada y alterada [2]. De esta perforación, el registro de sondeo de esta perforación se observa en el anexo 8.

4.2.6 Perforación PE-10

La información obtenida del inclinómetro colocado en esta perforación da como resultado un plano de rotura a los 38 m de profundidad.

Hasta los 18 m de profundidad de localizo el material coluvial, pero el contacto entre el coluvial y la roca se delimita a los 31 m de profundidad. De igual forma la perforación indica que hasta los 49 m de profundidad se encuentra roca fragmentada y alterada. Encontrándose también roca muy fracturada entre las siguientes cotas: 2224,2 y la 2221,2; 2214,1 y la 2211,7; 2208,7 y la 2207,7. El total de la perforación alcanzo los 100 m. Las fotografías 9, 10 son registros de la recuperación de testigos en diferentes cotas.



FOTOGRAFÍAS 9 y 10.- RECUPERACION DE TESTIGOS EN PERFORACIONES

Fotografías de los testigos recuperados del sondeo PE - 10 a diferentes profundidades, donde se aprecia el registro geológico de la roca muy fragmentada y a mayor profundidad la roca con menor grado de fractura. Fotografías proporcionadas por HIDROPAUTE.

Las fotografías 11 y 12 son muestras de testigos de la perforación PE – 10 a diferentes profundidades, en las mismas se observa una roca más sana a profundidades sobre los 50 m.



FOTOGRAFIAS 11 y 12.- RECUPERACION DE TESTIGOS EN PERFORACIONES

Fotografías de los testigos recuperados del sondeo PE - 10 a diferentes profundidades, donde se aprecia el registro geológico del Esquisto Cuarzo - Clorítico y Cuarcitas de mediana a ligeramente meteorizados, muy fracturados; con fracturas inclinadas 45° - 50° con respecto a la horizontal . Fotografías proporcionadas por HIDROPAUTE.

4.2.7 Perforación PE-11

En esta perforación se colocó un inclinómetro, el mismo que salió de funcionamiento por desplazamientos registrados en la zona quedando fuera de servicio antes de realizar la lectura inicial [12]. La profundidad del plano de ruptura se localizó a 21 m [8].

4.2.8 Perforación EIN-1

La capa de coluvial atravesada es de 2 m de espesor, las muestras recuperadas presentan un macizo rocoso con una fracturación alta hasta los 47 m de profundidad. En esta perforación se colocó un inclinómetro. La perforación al igual que en las otras perforaciones fue vertical y alcanzo los 101 m de profundidad [2].

4.2.9 Perforación EIN-4

La capa de material coluvial se localizó hasta una profundidad de 33 m, dentro de las características a destacar de la recuperación de testigos de esta perforación fue la presencia de cinco tramos de roca fragmentada en las siguientes cotas: 2337 a 2335; 2330 a 2328; 2323 a 2321; 2320 a 2316 y de la 2312 a 2304, en esta perforación se colocó un inclinómetro [2].



4.2.10 Perforación EIN-5

Se colocó un inclinómetro, se observa que el contacto coluvión roca se encuentra aproximadamente a los 16,7 m, de igual forma se identificaron zonas de roca fragmentada y alterada entre las siguientes cotas: 2349,8 y la 2342,3; 2337,7 y la 2336,3; 2287,7 y la 2286,3; 2280,6 y la 2278,9; 2278,3 y la 2276,9. [2]

4.2.11 Perforación EPZ-1

El grosor de la capa del coluvial recuperada fue de 8,7 m. Al recuperar los testigos de esta perforación que fue realizada en una área ejecutada fuera de la zona del deslizamiento, se observó que al atravesar el macizo rocoso la recuperación fue muy baja por lo cual se deduce que la roca tiene una gran alteración y fragmentación. La perforación fue vertical, alcanzado una profundidad de 95 m [2]. En esta perforación se colocaron dos piezómetros de cuerda vibrante a los 65 m y 94 m de profundidad [8].

4.2.12 Perforación EPZ-2

Se localizó el contacto coluvión/roca a los 4,4 m de profundidad, se realizó esta perforación fuera del área directa del deslizamiento. Hasta los 53 m de profundidad la roca se presente altamente fracturada por lo cual la recuperación de testigos fue baja. [2].

4.2.13 Perforación EPZ-3

Este pozo está ubicado dentro del área de deslizamiento, alcanzado la perforación una profundidad de 100 m, dando como resultados la información que el deposito coluvial tiene un grosor de 7 m. Se observa en los informes emitidos que hasta los 30 m la roca se presenta de fragmentado a extremadamente fracturada. En esta perforación se colocó un piezómetro. [2].

4.2.14 Perforación EPZ-4

De esta perforación no se obtuvo mayor información, el contacto coluvión/roca se encuentra a los 21,9 m de profundidad y la recuperación de testigos muestra que el macizo rocoso se presenta poco fracturado. [2].



4.3 Análisis de los datos de inclinómetros

En la zona de desplazamiento en el lapso de tiempo acotado según lo recopilado y señalado en los literales anteriores en total se colocó 7 inclinómetros que pudieron dar resultados de monitoreo. Hasta el mes de marzo del año 2009 los únicos inclinómetros que aún estaban operando eran los correspondientes a las perforaciones EIN-1 y EIN-5. Las lecturas en forma promedia fueron de 25 días, a través de las cuales se pudo obtener un desplazamiento en función del tiempo.

Como se mencionó anteriormente los meses céntricos del año presentan un incremento de lluvias en la zona, esto tuvo una incidencia directa en las lecturas de los inclinómetros ya que en estos meses las curvas de desplazamiento vs tiempo presentaron aceleraciones, específicamente en los meses de mayo a octubre en los cuales cada año se registran las mayores precipitaciones.

En la presente investigación se realizará la modelación en función de la información obtenida y proporcionada por HIDROPAUTE, no se obtuvo información actualizada de la instrumentación. De igual forma se aclara que la nomenclatura utilizada en la investigación es la misma que se tiene en el campo, no sigue una secuencia en la identificación de los instrumentos. La ubicación de los inclinómetros se observa en el anexo 7.

4.3.1 Inclinómetro PE – 2

Este inclinómetro registro una deformación acumulada de 140 mm en 151 días de monitoreo, representando una velocidad promedio de los desplazamientos de 2,78 cm/mes, fue colocado en el mes de julio del 2005 y funciono hasta el 19 de diciembre del año 2005, localizo un plano de rotura a la profundidad de 52 m y a los 24 m [8].

4.3.2 Inclinómetro PE – 3

Se registró una deformación acumulada hasta el mes de junio del 2007 de 247 mm en 655 días de funcionamiento, representando una velocidad promedio de desplazamiento de 1,13 cm/mes, funciono hasta el 23 de junio del 2007, registro planos de rotura a los 17, 27 y 32 m de profundidad [8]. En el gráfico 9 se observa el desplazamiento registrado en función de la precipitación que registro el instrumento PE – 3, el desplazamiento a los 31,5 m de profundidad identificado como plano de falla es de 7,3 cm por año.

DESPLAZAMIENTO - PRECIPITACIÓN (PE-03)
CABEZA Y FONDO DE INSTRUMENTO

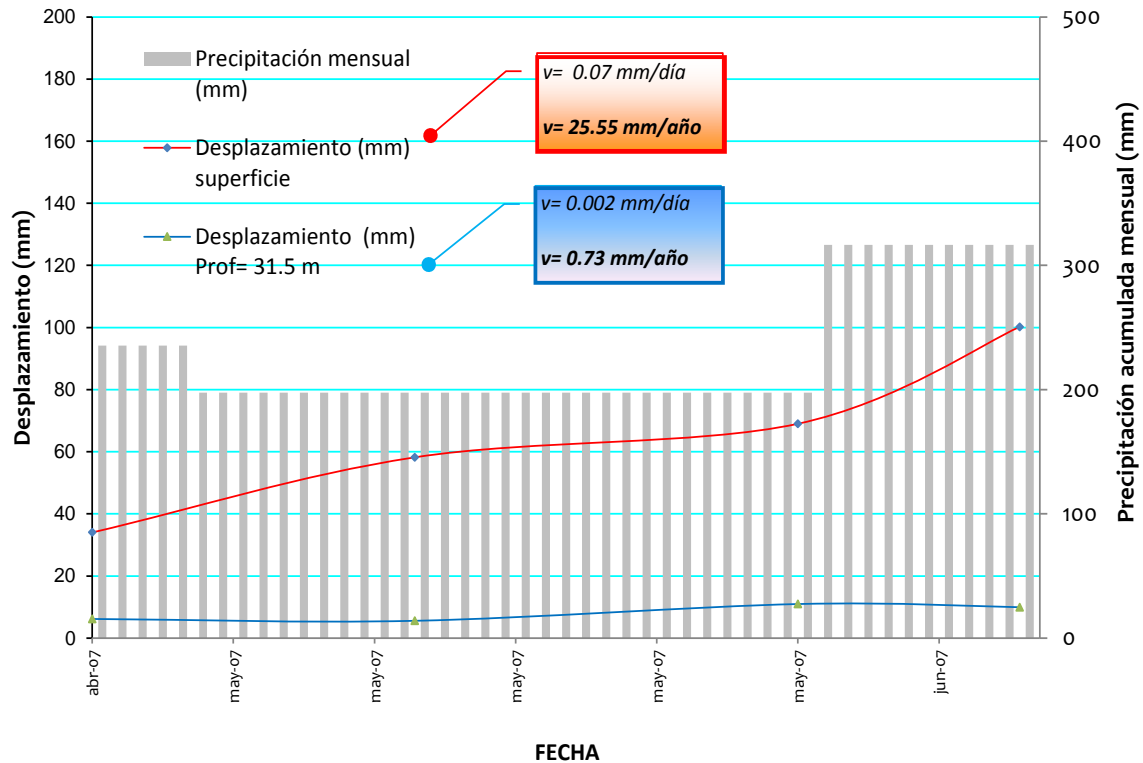


Gráfico 9.- Desplazamiento registrado en el inclinómetro PE – 3 en función de la precipitación mensual acumulada. Como se observa en el gráfico en el mes de abril el desplazamiento es menor, mientras que en el mes de junio, aumenta con la pluviosidad. Gráfico proporcionado por HIDROPAUTE. [8]

En los gráficos 10 y 11 se muestran un perfil en función de las perforaciones realizadas PE – 3 y PE – 8, en los mismo se localizaron la superficies de falla por donde se producirían movimientos, se observa los estratos identificados en la perforación junto con sus espesores. Adicional se observa el desplazamiento acumulado registrado en la zona.

De la información recopilada se realizó la adaptación del gráfico en función de los estratos y se identificó los planos de rotura.

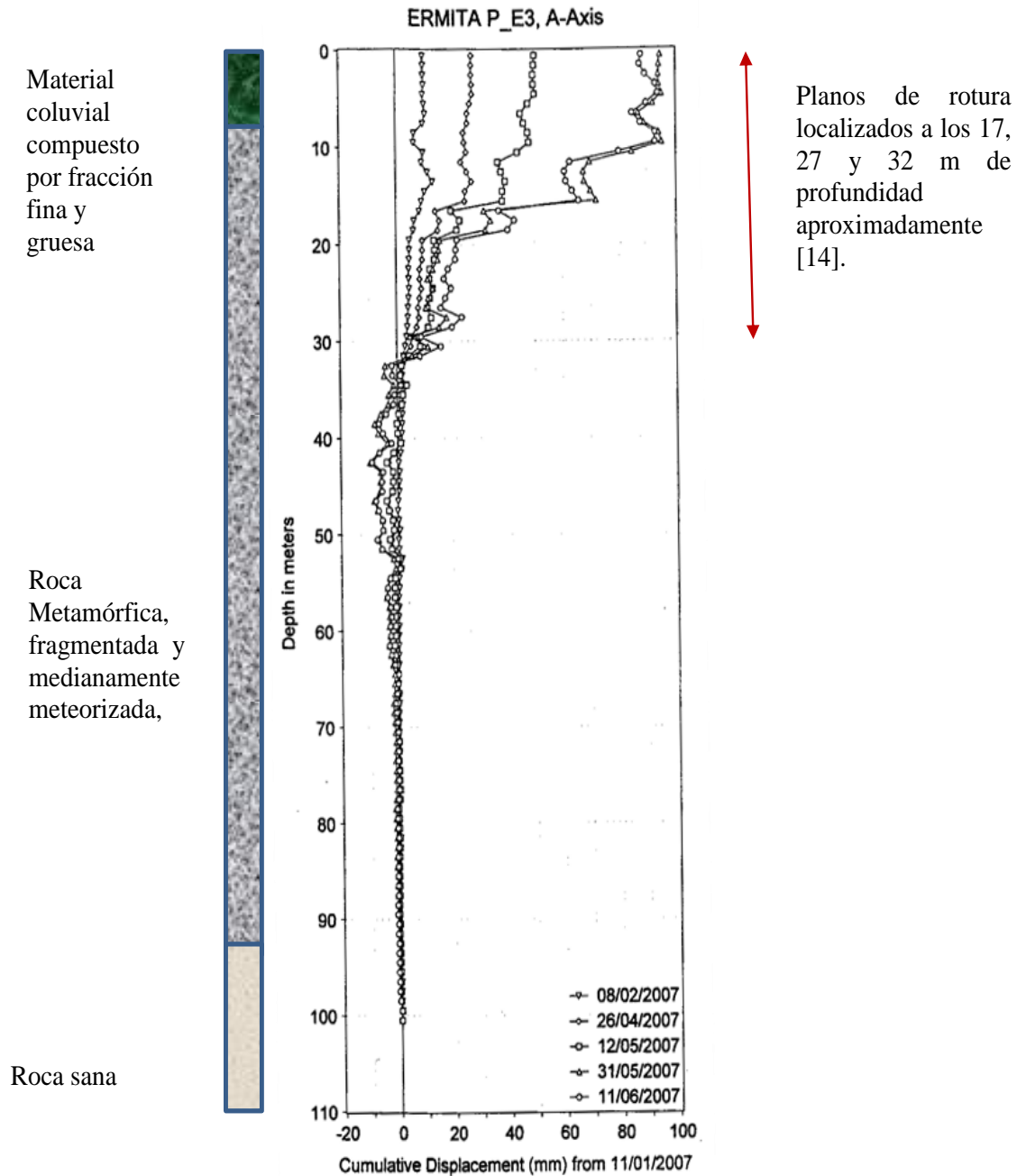


Gráfico 10.- Registro de lecturas del inclinómetro PE – 3, se observa tres planos de rotura a diferentes profundidades de la perforación. También se puede observar el desplazamiento acumulado en un periodo de tiempo en este inclinómetro. Gráfico proporcionado por HIDROPAUTE [14], adaptación de los estratos para el presente trabajo.

4.3.3 Inclínómetro PE - 8

Fue colocado desde el mes de mayo del 2007, en el periodo de 30 días de registro se observó una deformación acumulada de 54 mm, que representa un desplazamiento similar a 5, 40 cm/mes. Presento planos de rotura a los 30 y 62 m de profundidad [8].

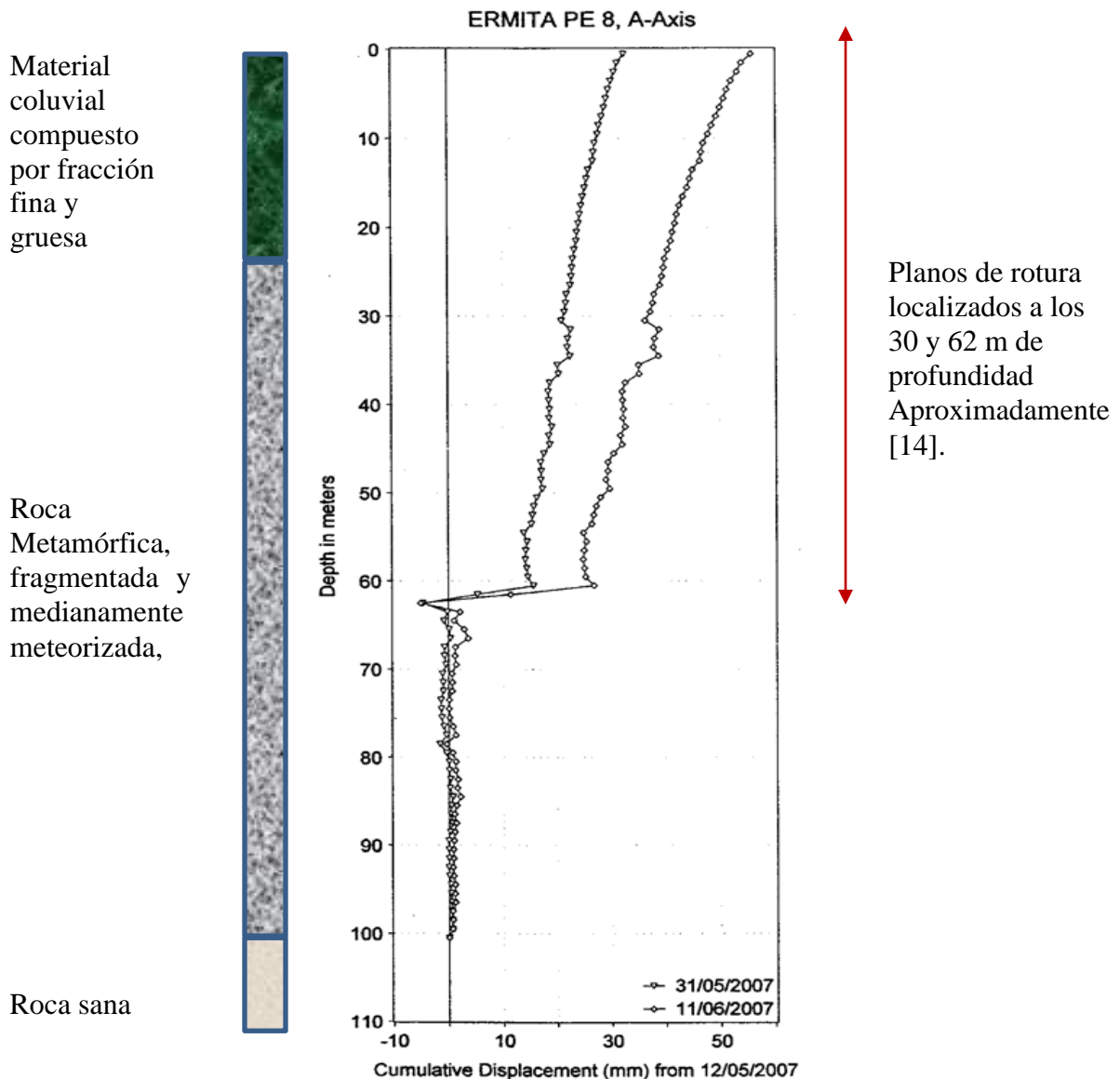


Gráfico 11.- Registro de lecturas del inclinómetro PE – 8, se observa dos planos de rotura a diferentes profundidades de la perforación. Gráfico proporcionado por HIDROPAUTE [14], adaptación de los estratos para el presente trabajo.

4.3.4 Inclínómetro PE - 10

Presento planos de rotura a los 9, 17 y 38 m de profundidad, su monitoreo empezó el 11 de junio del 2007, quedando fuera de servicio el 23 de junio del mismo año por lo cual solo se tomó la lectura inicial [8].

4.3.5 Inclínómetro PE – 11

De los registros se obtuvo que presento a los 21m de profundidad el plano de rotura, su funcionamiento empezó el 10 de mayo del 2007, no se pudo tomar la lectura inicial puesto que quedo fuera de funcionamiento [8].

4.3.6 Inclínómetro EIN – 4

Se registró con la perforación al colocar el inclinómetro que el coluvial se encuentra a los 33 m de profundidad, se observaron cinco tramos de roca fracturada y presento superficie principal de rotura los 31,50 m [14].

En el gráfico 12 se observa la relación entre la precipitación y el desplazamiento registrado, al igual que en el PE - 3 se identificó el plano principal de falla bajo los 31 m de profundidad. Se observa que el desplazamiento entre los meses de septiembre y octubre disminuye al igual que la precipitación registrada.

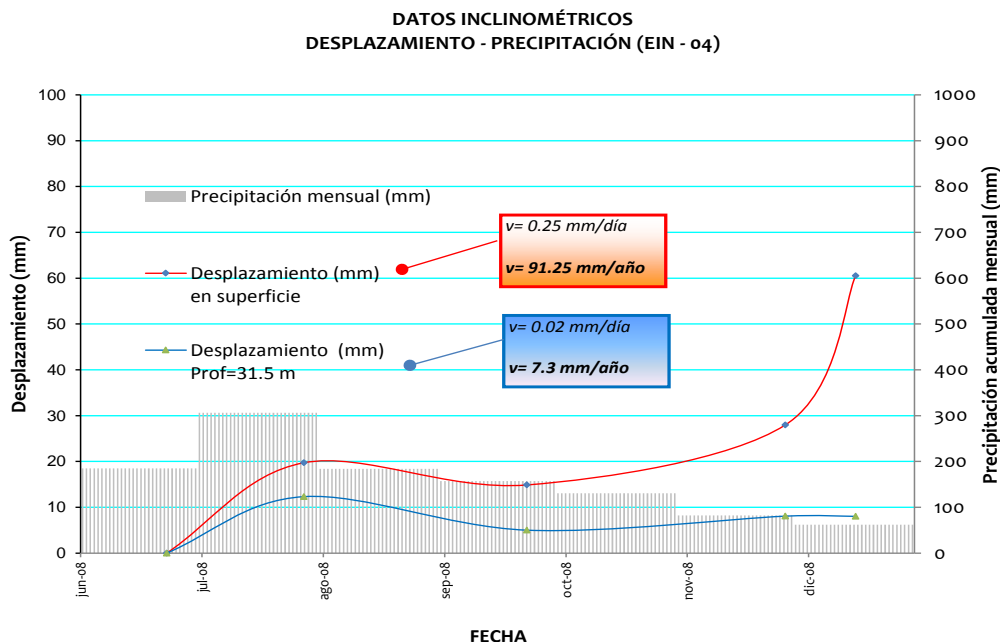


Gráfico 12.- Se observa que el desplazamiento a los 31 m de profundidad es el mayor y concuerda con el mes de mayor precipitación de ese año, el mes de julio. Gráfico proporcionado por HIDROPAUTE [8].

4.3.7 Inclínómetro EIN – 5

Se localizó el plano de rotura a los 16,5 m, de igual forma el límite de la capa de material coluvial se encuentra similar a esta profundidad, posteriormente el sustrato rocoso se identifica fragmentado y alterado. Este inclinómetro registró datos hasta el mes de diciembre del año 2010.

En el gráfico 13, se identificó un desplazamiento registrado en el inclinómetro EIN – 5 de 3,65 cm por año, en el mismo se presenta una superficie de rotura a los 16,5 m de profundidad. En estos gráficos se observa por año los desplazamientos tanto los registrados en la superficie como los registrados a profundidad.

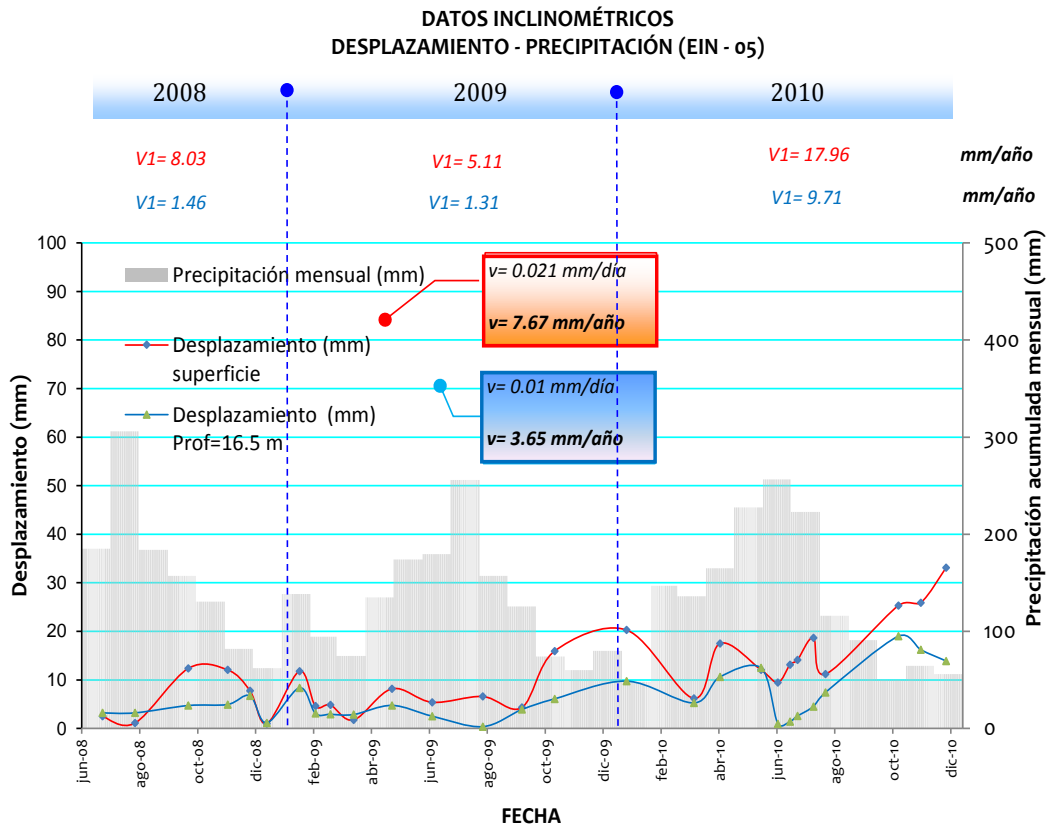


Gráfico 13.- Registro del desplazamiento vs precipitación obtenidos en el inclinómetro EIN – 5, se puede observar que en los tres años de medición los meses de mayor precipitación se da en el mes de julio, no así los mayores desplazamientos [8].



En el gráfico 14 se observa un resumen de los principales desplazamientos registrados en los inclinómetros instalados hasta el 2009 en la zona La Ermita, incluido el EIN – 1 [2].

Se observa que los mayores desplazamientos se dieron en los meses intermedios en la zona donde se encuentra el inclinómetro PE – 3 y el PE – 2, acumulando hasta junio del 2007, 280 mm de desplazamiento registrado y 130 mm respectivamente, estos inclinómetros como se observa en el anexo 7, están dentro de la zona de mayor riesgo del desplazamiento, se verifica también en el gráfico que los meses intermedios son los de mayor movimiento.

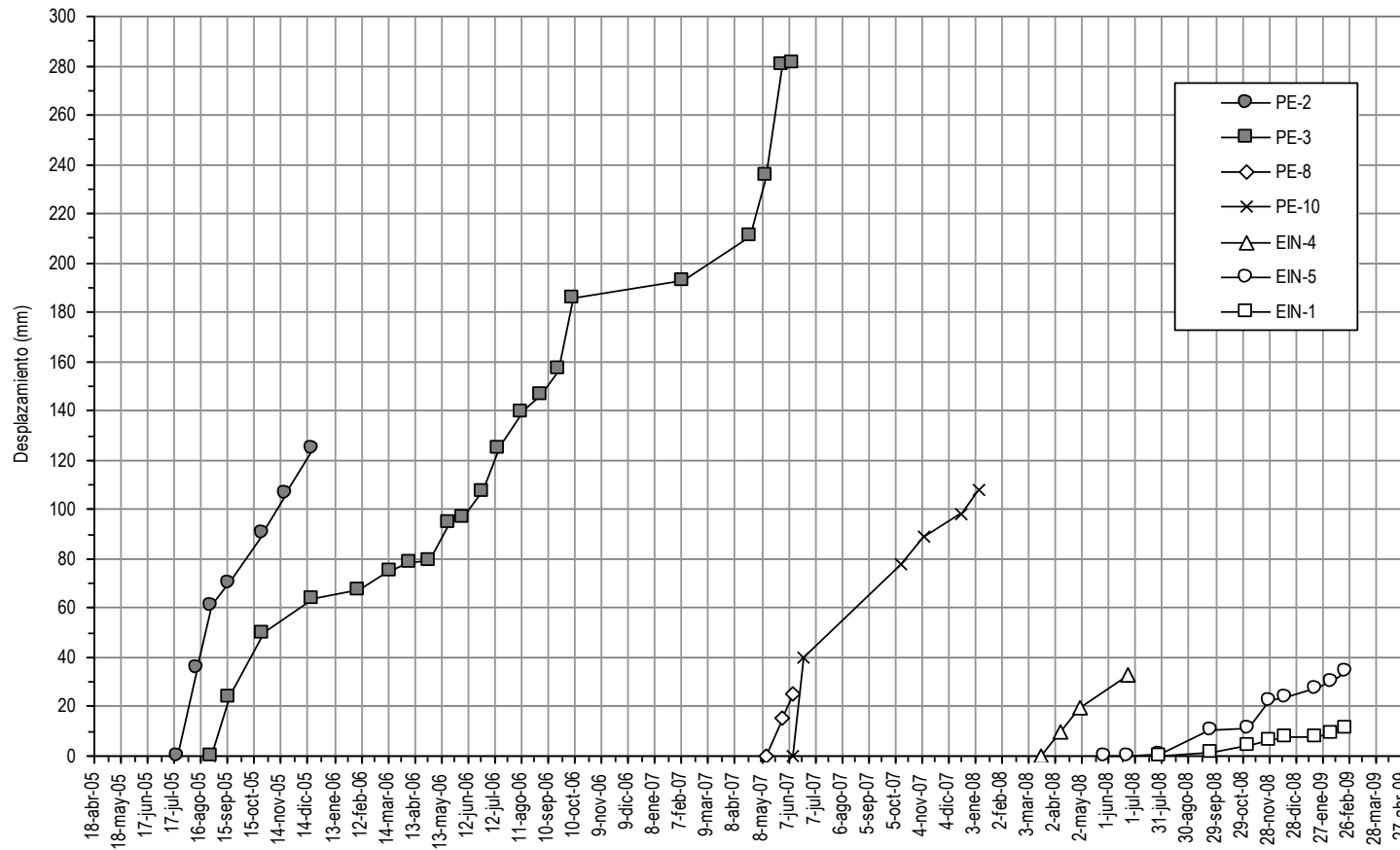


Gráfico 14.- Registro de desplazamientos localizados en los inclinómetros instalados del periodo 2005 al 2009 en el deslizamiento La Ermita Sur. No se incluye el inclinómetro PE – 11 ya que no se tiene registro de lectura. Gráfico proporcionado por HIDROPAUTE y adaptado al presente trabajo [2].



4.4 Análisis de los datos de piezómetros

Los piezómetros son utilizados en las perforaciones para medir y monitorear la presión de poros, que es la presión que ejerce el agua subterránea atrapada en el suelo o en la roca, estos pueden ser abiertos, neumáticos o vibratorios, su utilidad depende de la precisión que se requiera [11].

Desde el año 2005 en la zona de estudio, se han registrado variaciones en los niveles del agua en 12 perforaciones, las mediciones se realizaron en promedio con una frecuencia semanal [2].

En el grafico 15 se observa la relación que existente entre la pluviosidad y los registros del nivel freático, las variaciones de éste son pequeñas considerando solamente los registros de pozos localizados en la zona del deslizamiento, el mayor desnivel registrado se encuentra en el registro de la perforación PE-1 con 7,59 m, en el anexo 9 podemos observar los registros respectivos [2]. Como observación se puede apreciar que en la perforación PE – 3 desde el mes de octubre del 2006, se tiene un incremento progresivo del nivel freático a pesar que la pluviosidad en los últimos meses del año disminuye [2].

En el gráfico 16 se observa las variaciones de lecturas de los piezómetros de cuerda vibrante instalados desde el año 2007 al 2012, con la particularidad del nivel de embalse a partir del año 2010. Se puede observar que el nivel del embalse no afecta al nivel freático registrado en la zona.

Analizando la fluctuación registrada en la perforación PE – 3, observamos que los valores picos coinciden con los valores picos registrados en el llenado de la presa, a partir de febrero del 2010, teniendo aparente influencia el llenado con el registro.

.

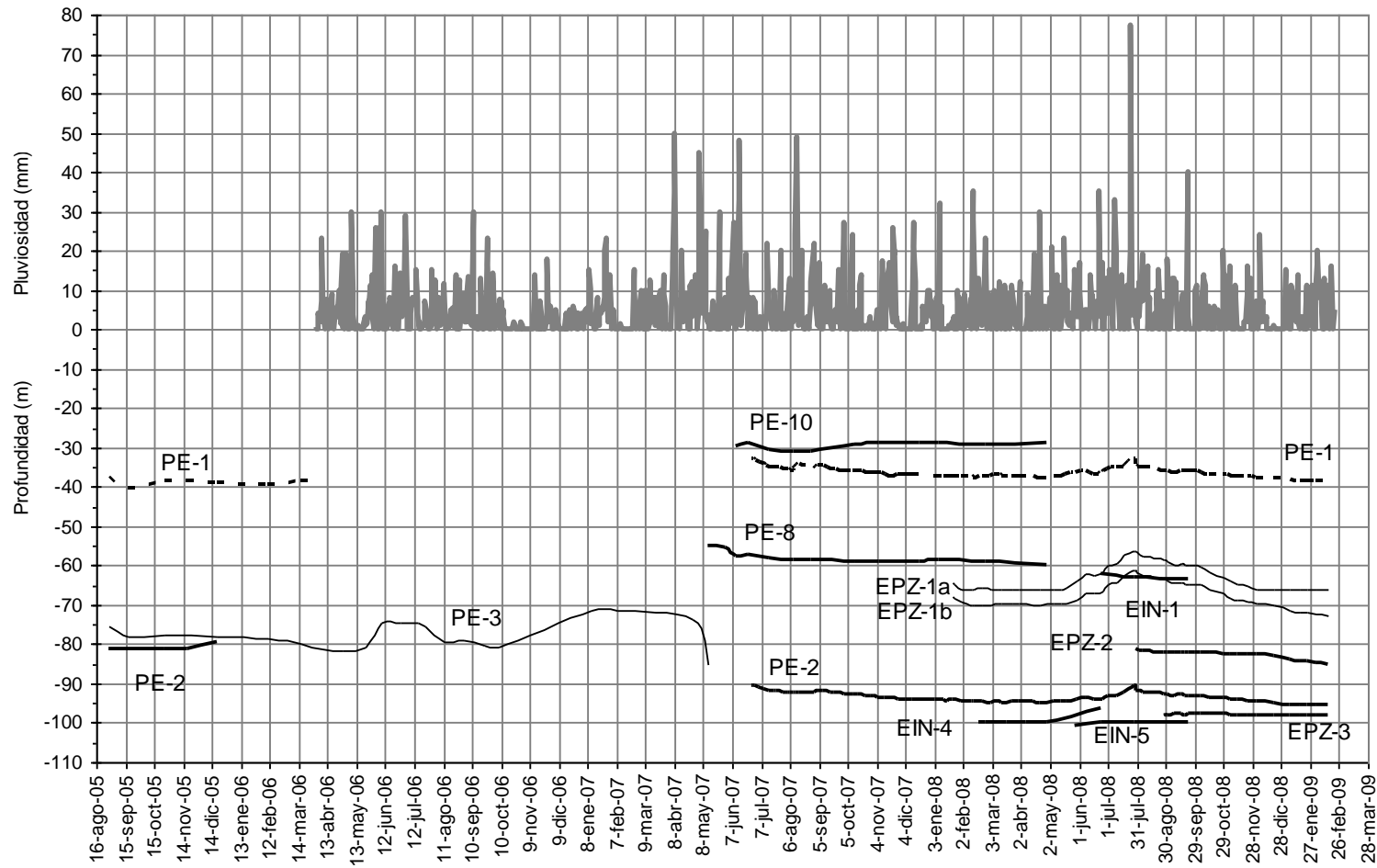


Gráfico 15.- Registros de los niveles de agua medidos por los piezómetros existentes en la zona de estudio y su correlación con la pluviosidad en diferentes fechas. Gráfico y datos proporcionados por HIDROPAUTE [2].

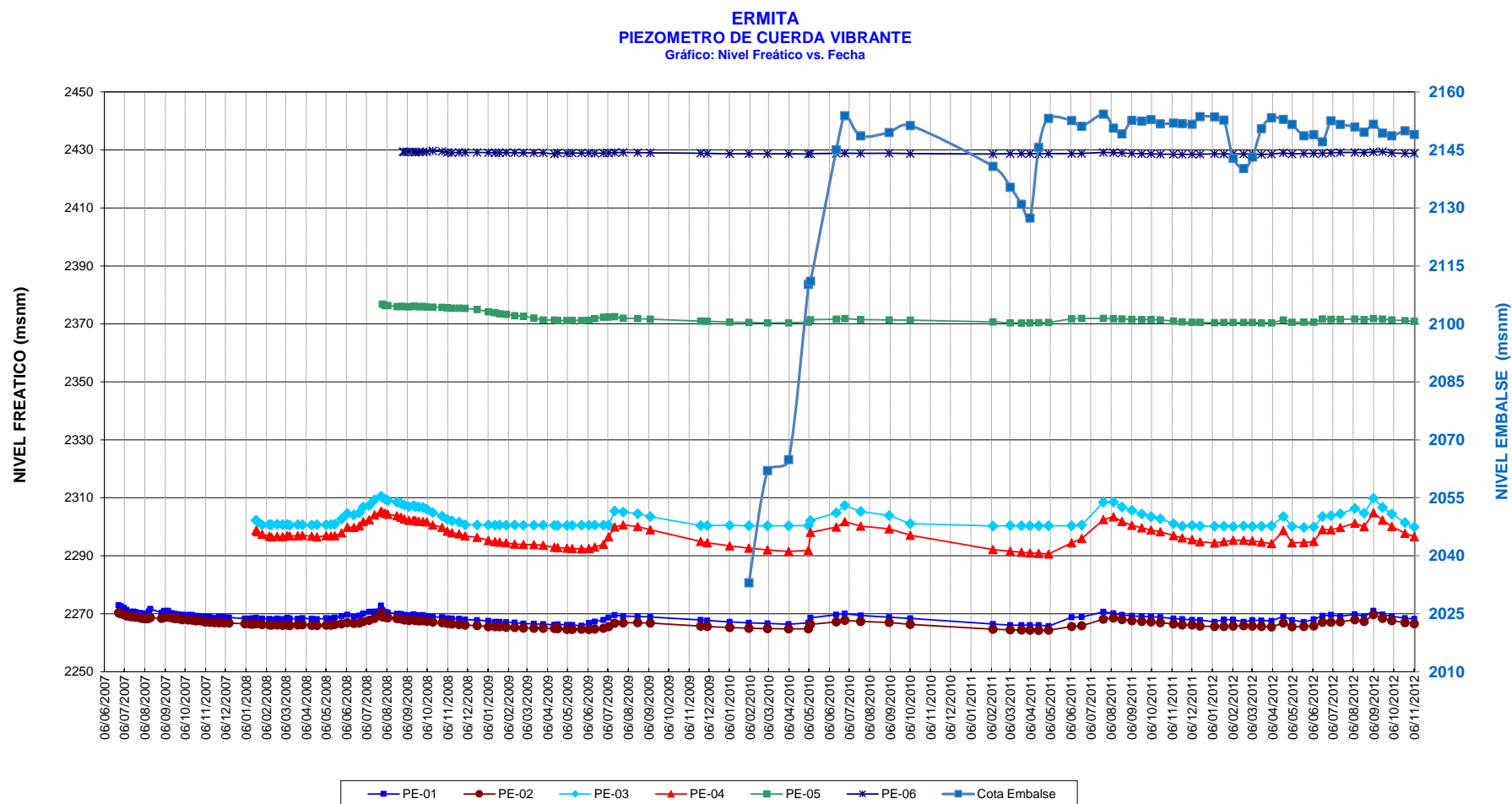


Gráfico 16.- Fluctuaciones del nivel freático registrados en los piezómetros antes durante y después del llenado de la presa, registros desde el año 2007 hasta el año 2012. Gráfico y datos proporcionados por HIDROPAUTE [15].

4.5 Mojones monitoreados en la zona de estudio

El monitoreo de la zona inestable, desde el año 2006 hasta la recopilación del 2012 incluyó los hitos de cabeza de la instrumentación colocados en las primeras perforaciones registradas, así como mojones superficiales colocados a partir del año 2010. La suma total de hitos colocados recopilados en la zona de estudio es de 22, el resumen de su actividad se puede observar en el anexo 10, su ubicación en los anexos 11 y 12, en los mismos se aprecia que los de mayor movimiento son los directamente relacionados a la zona de estudio.

Esta información ha permitido conocer la magnitud del desplazamiento que ocurre en la superficie a partir del monitoreo de los hitos colocados en la zona [2].

Como se puede observar en el anexo 10, existen dos períodos de registros, los primeros correspondientes al lapso de febrero del 2006 a junio del 2010 (exceptuando el mojón TE- 4, hasta noviembre del 2011) que son hitos de cabeza y los monitoreados en el período abril del 2010 a septiembre del 2012 [15].

El primer grupo presenta una velocidad de movimiento mayor, registrando las más altas velocidades en los mojones: **TE - 4, PE - 11, PE - 2, PE - 1, PE - 3**, en ese orden, mientras que del segundo periodo el orden de velocidades promedio por día es mucho menor que el primero, en el orden: **CT- 3, CT - 10, CT - 2, CT - 5, CT - 9**. Esta disminución considerable en la velocidad promedio de movimiento puede deberse al hecho de que desde el mes de febrero del 2010 se empezó con el llenado del embalse de la presa, concluyendo el periodo de construcción de los diferentes frentes de trabajo, concluyendo las voladuras para excavaciones, etc., que actúan como factores desencadenantes (anexo 2), pudiendo ser este un factor que estaba afectado a la estabilidad, por otro lado es probable que el deslizamiento empezó a auto estabilizarse en estos últimos años.

En los gráficos 17 y 18 se observa la influencia de la pluviometría en la velocidad de movimiento de los mojones, de igual manera el azimuth de movimiento registrado en los de mayor movimiento [15]. En el hito TE- 4 se registró un desplazamiento de 42,7 cm en el año, el azimuth del movimiento registrado en este hito señala con dirección a la presa.

La información proporcionada por HIDROPAUTE referente a la dirección de movimiento es coincidente con la calculada para el presente trabajo, confirmándose que el azimuth es en dirección de la presa.

4.5.1 Mojón TE – 4

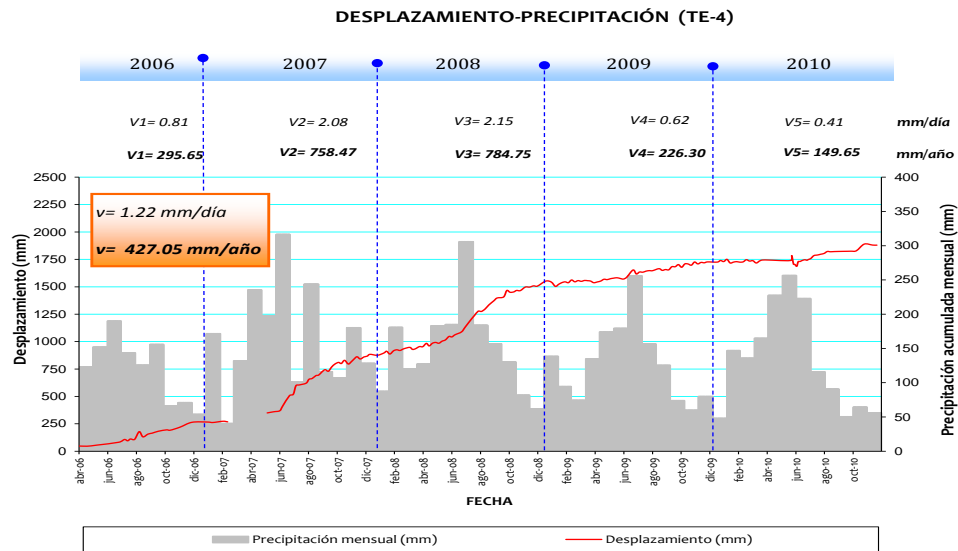


Gráfico 17.- Relación directa entre la pluviometría y el desplazamiento ocurrido en el mojón TE – 4 año tras año, se observa que en el año 2009 y 2010 la velocidad disminuye considerablemente. Gráfico proporcionado por HIDROPAUTE [15].

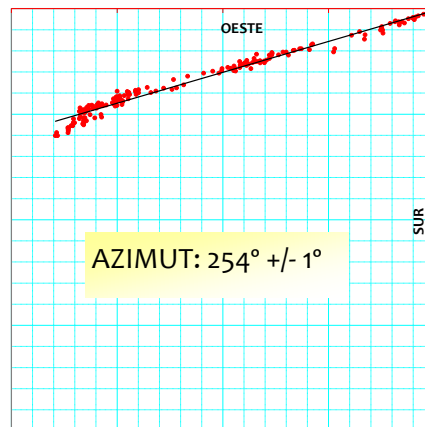


Gráfico 18.- El ángulo formado entre el norte y la presa es de 254° , indica que el movimiento es hacia el embalse. Azimut de movimiento del mojón TE – 4. Información proporcionado por HIDROPAUTE [15]. Gráfico adaptado para el presente trabajo.

En el gráfico 19 se observa la velocidad de movimiento en relación con la precipitación registrada por el mojón TE – 4, el año de mayor movimiento es el 2008 entre los meses de invierno, se denota un decrecimiento de la velocidad en el año 2010, lo que nos indica que el movimiento tiende a decrecer en este periodo de tiempo.

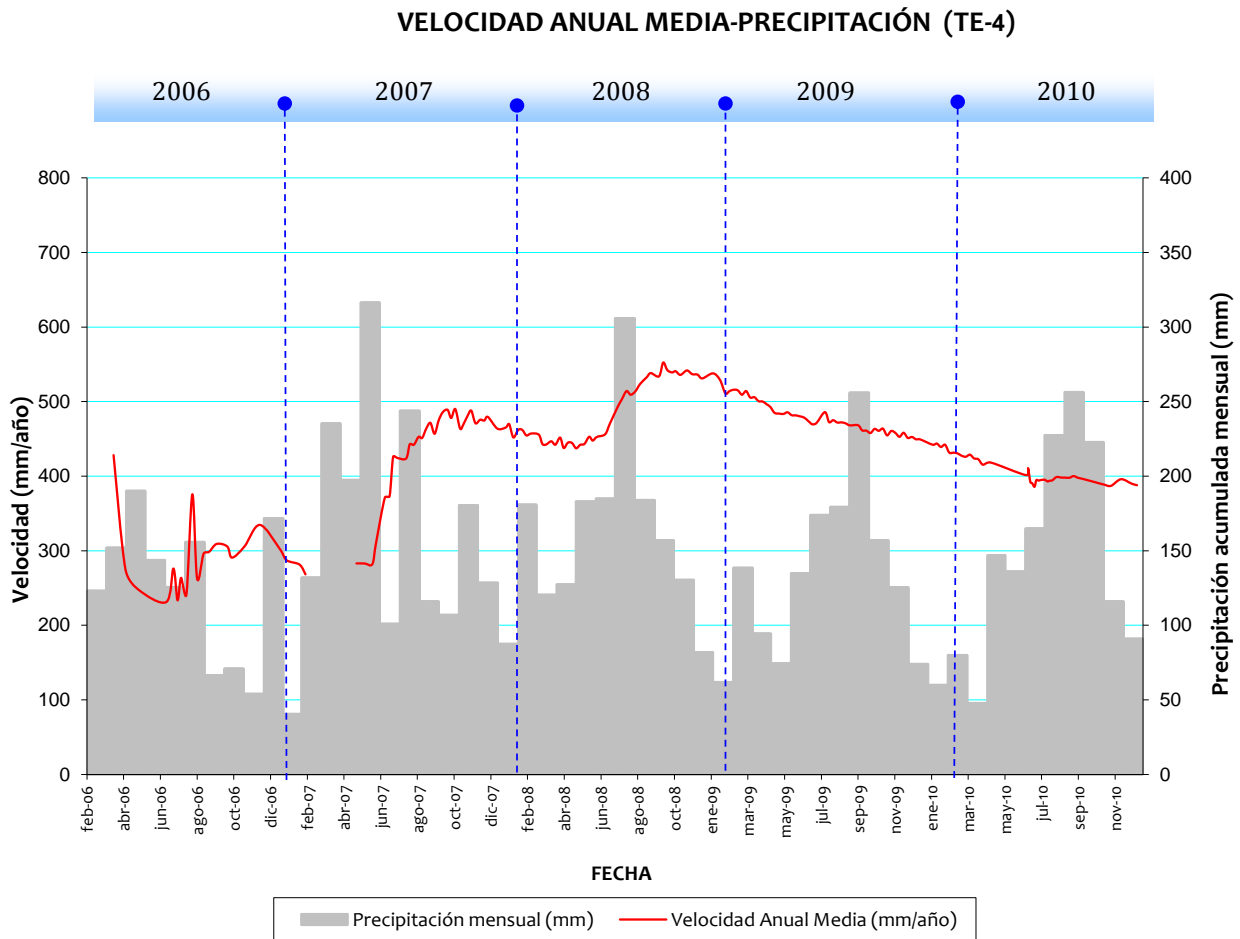


Gráfico 19.- Precipitación acumulada mensual registrada en el mojón TE – 4 y su relación con la velocidad, se observa que en los meses de mayor precipitación aumenta la velocidad, tiende a disminuir a partir del año 2010. Gráfico proporcionado por HIDROPAUTE [15].

El gráfico 20 muestra el desplazamiento registrado en función de la pluviometría del mojón PE – 11, en este caso el acumulado es de 52,10 cm por año siendo los mayores registros de desplazamiento en el año 2010. En el gráfico 21 observamos el azimuth de este mojón, al igual que el gráfico 18, su dirección es hacia la presa.

4.5.2 Mojón PE -11

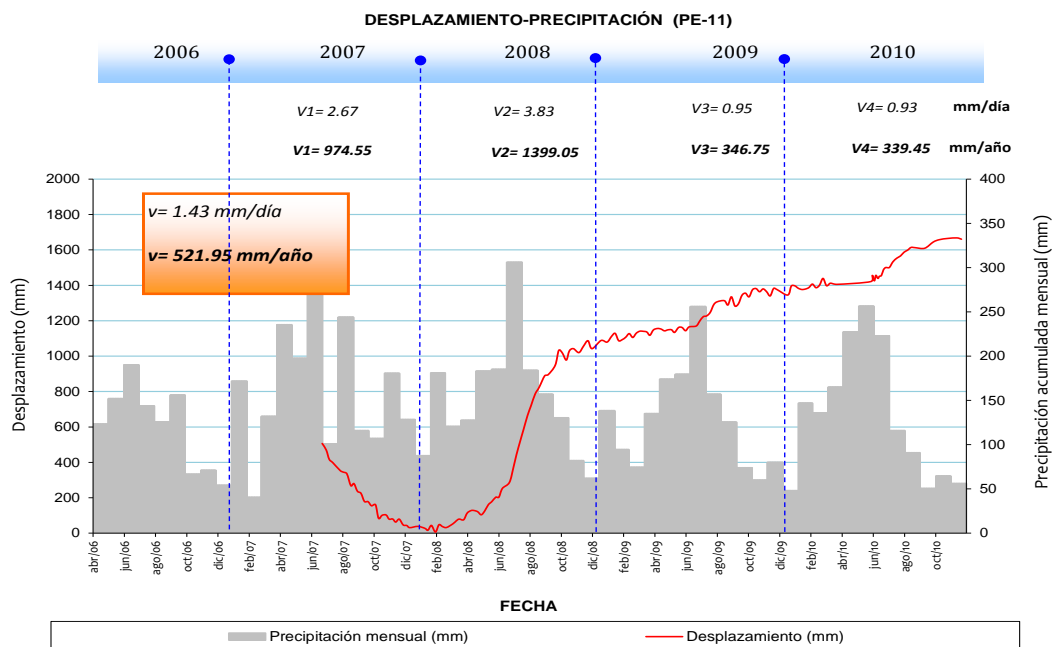


Gráfico 20.- Relación entre la pluviometría y el desplazamiento ocurrido en el mojón PE - 11 año tras año, se observa que en el año 2009 y 2010 la velocidad disminuye considerablemente. Gráfico proporcionado por HIDROPAUTE [15].

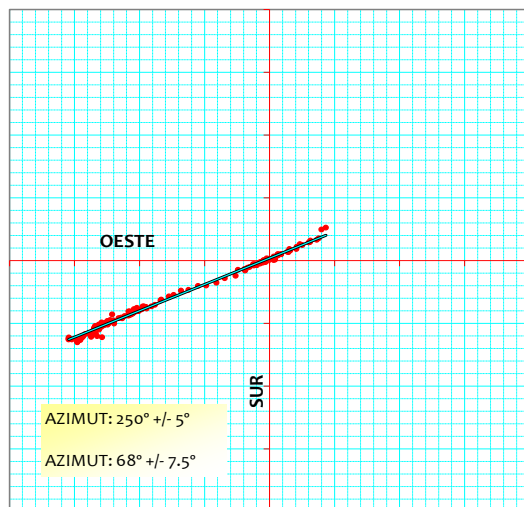


Gráfico 21.- Azimut de movimiento del mojón PE - 11. Información proporcionado por HIDROPAUTE [15], gráfico adaptado al presente trabajo.

En el gráfico 22 se registra la velocidad de movimiento en función de la precipitación que registro el PE – 11, marcando que en el mes de junio del año 2007 se dá el mayor movimiento con una velocidad de 1600 mm por año.

Este registro del 2007 muestra una velocidad de movimiento alta entre los meses de junio y agosto, baja notoriamente en febrero del 2008 por causa probable de la disminución de lluvias en ese mes y tiende a ser casi constante desde octubre del 2008 en adelante lo que indica que existió un control en la infiltración.

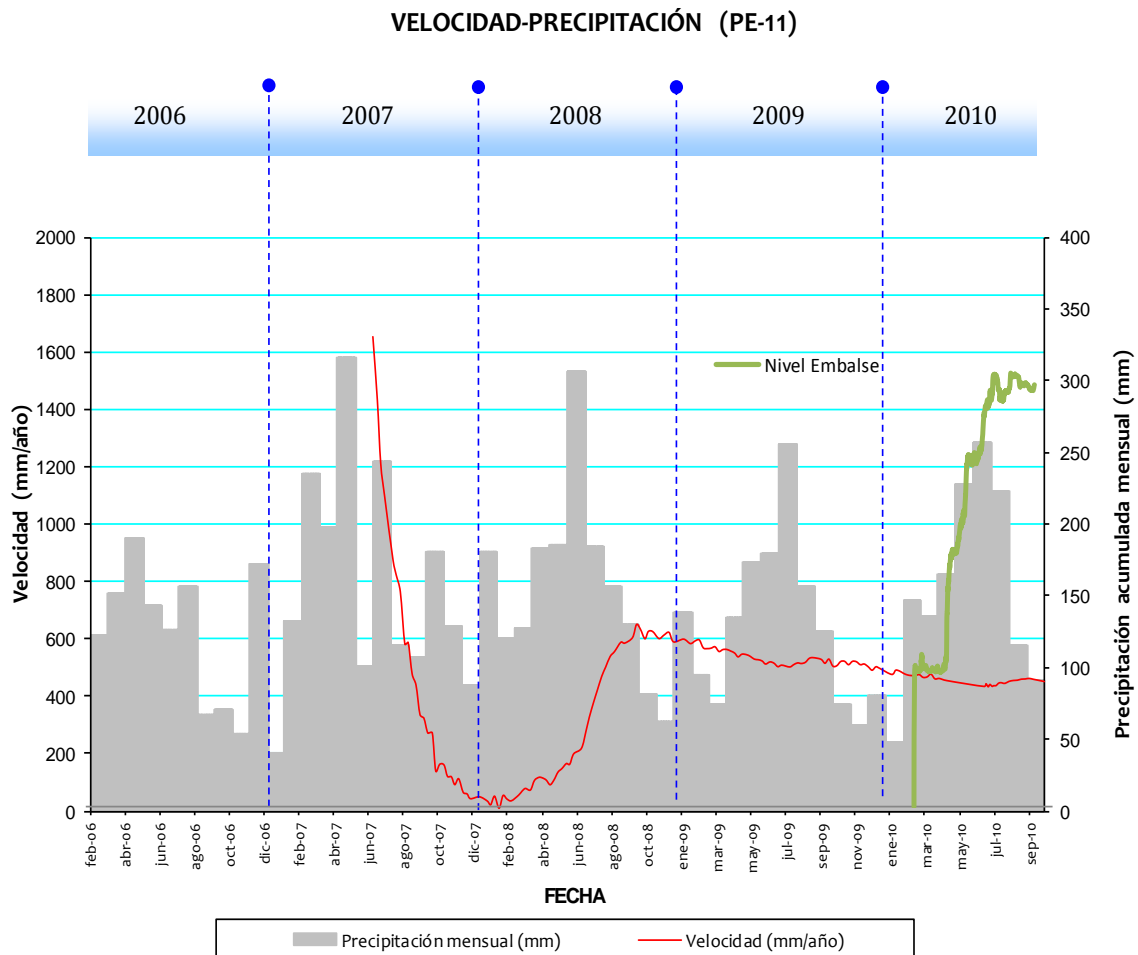


Gráfico 22.- Relación de la velocidad de movimiento con la precipitación registrada en el mojón PE – 11, se puede observar que en el año 2007 entre los meses de mayo a julio la velocidad aumenta pero en el año 2010 disminuye, el llenado de la presa a inicios del 2010 no tiene ninguna influencia en la velocidad. Gráfico proporcionado por HIDROPAUTE [15].



En los gráficos 23 y 24 se puede observar los desplazamientos en función de las precipitaciones que se han registrado para los dos grupos de mojones colocados en la zona, tanto para los del periodo colocados en el 2006 y los del 2010. En los gráficos 25 y 26 se observa las velocidades de movimiento registrados en el mismo periodo en estos dos grupos.

Analizando la información del gráfico 23, el mojón CT – 5, que se encuentra dentro de la zona de mayor movimiento (anexo 12), se observa que en el promedio de 8 meses, muestra uno de los mayores desplazamientos, alrededor de los 170 mm, y guarda relación con la precipitación mensual acumulada.

En el gráfico 24, analizando la información del control topográfico PE – 8, se aprecia que en los meses entre diciembre del 2007 y febrero del 2008 prácticamente no existe desplazamiento, siendo esta una época de lluvias bajas, mientras que entre los meses de mayo y julio del 2009 su desplazamiento se reactiva siendo meses de una pluviometría alta.

En el gráfico 25, analizando al hito PE – 8, se observa que la velocidad de movimiento tiene relación directa con el desplazamiento registrado, entre los meses finales del 2007 y los de inicio del 2008 no registra velocidades de movimiento y se reactiva en los meses de mayor precipitación, el hito PE – 11, que se ubicado dentro de la zona de mayor movimiento tiene comportamiento similar.

En el gráfico 26, el mojón CT – 5, muestra su mayor velocidad de movimiento en los meses de mayor lluvia y una menor velocidad en los meses de sequía.

4.5.3 Resumen actividad mojones monitoreados en la zona

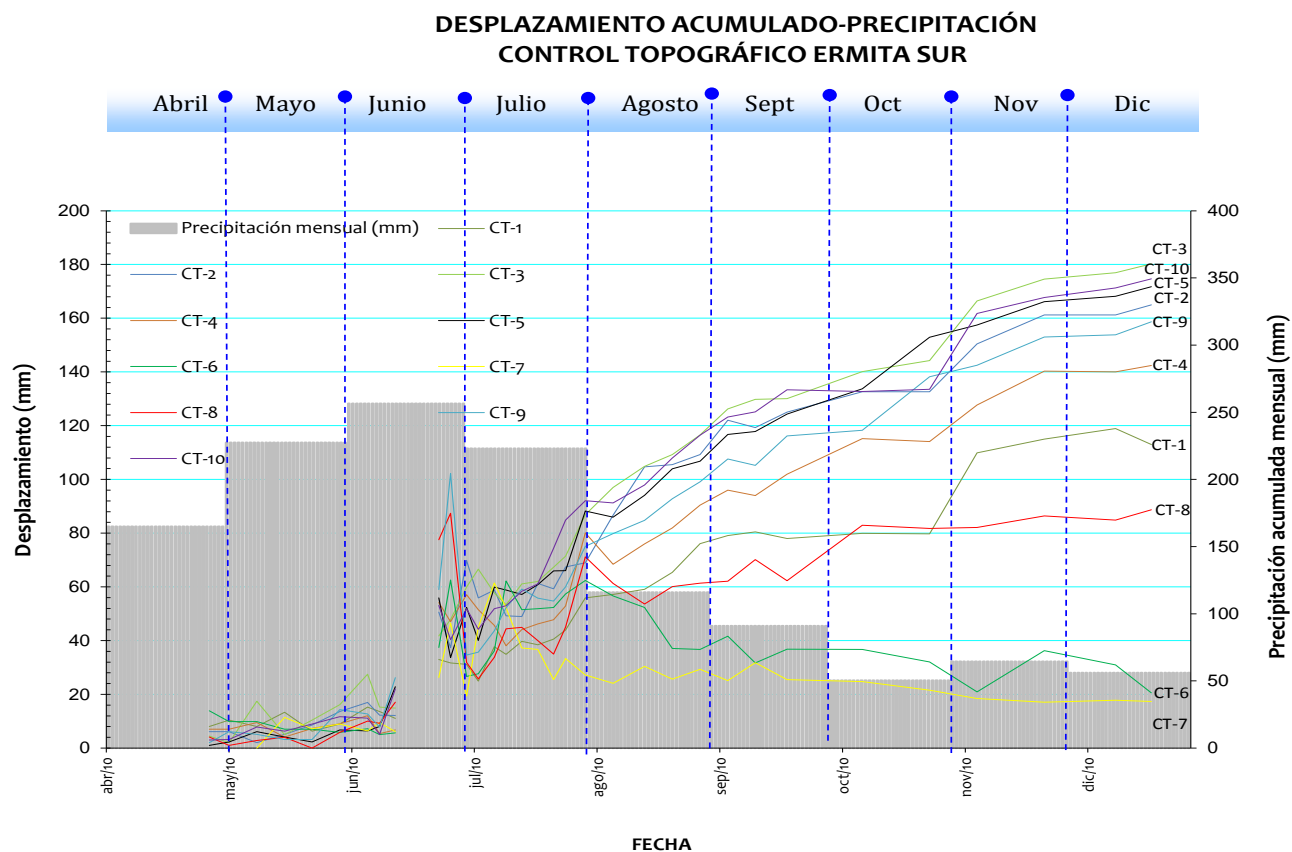


Gráfico 23.- Desplazamiento acumulado, su relación con la precipitación y los mojones colocados en el año 2010 en la zona del deslizamiento, la disminución del desplazamiento se evidencia a partir de este año. Gráfico proporcionado por HIDROPAUTE [15].

DESPLAZAMIENTO ACUMULADO-PRECIPITACIÓN CONTROL TOPOGRÁFICO ERMITA SUR

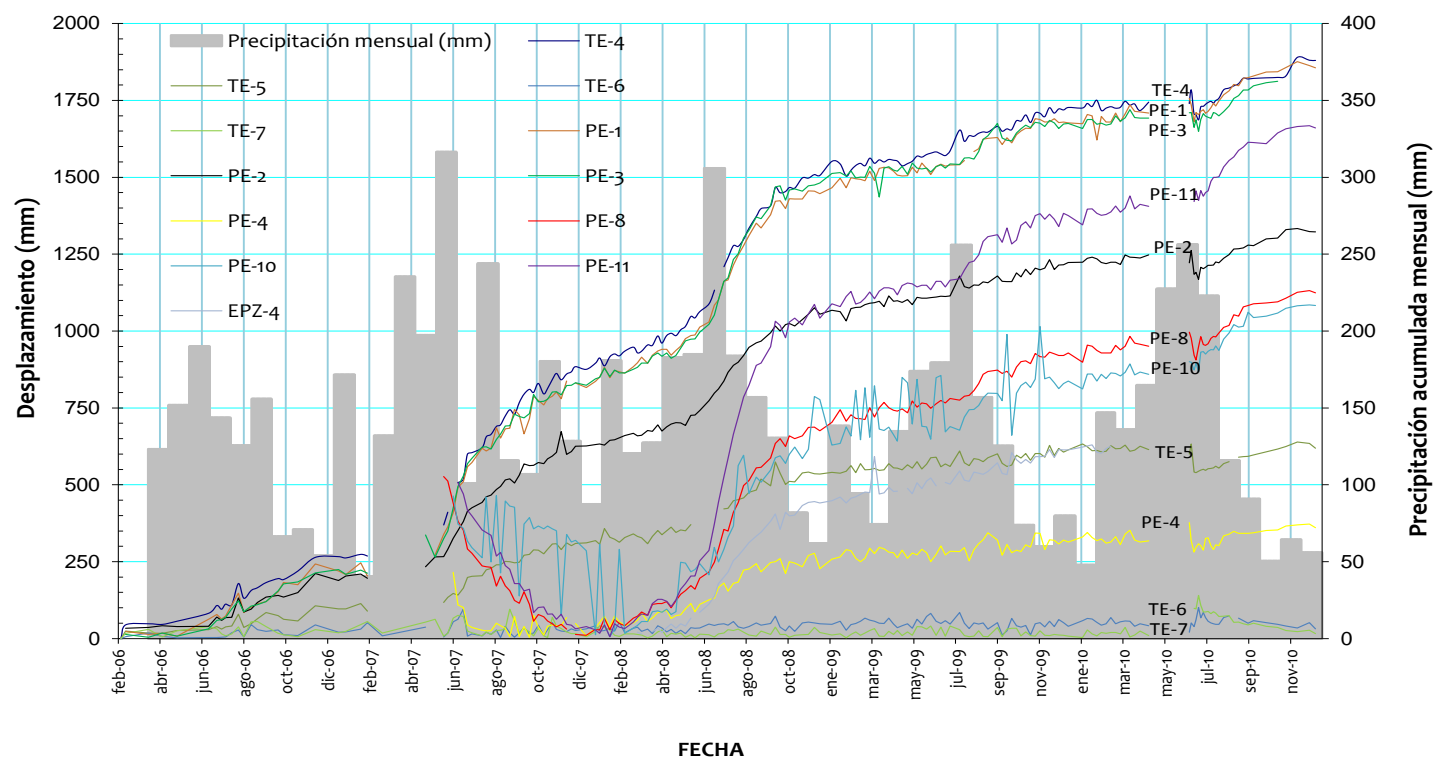


Gráfico 24.- Desplazamiento acumulado, su relación con la precipitación y los mojones colocados en el periodo 2006 - 2008 en la zona del deslizamiento. Gráfico proporcionado por HIDROPAUTE [15].

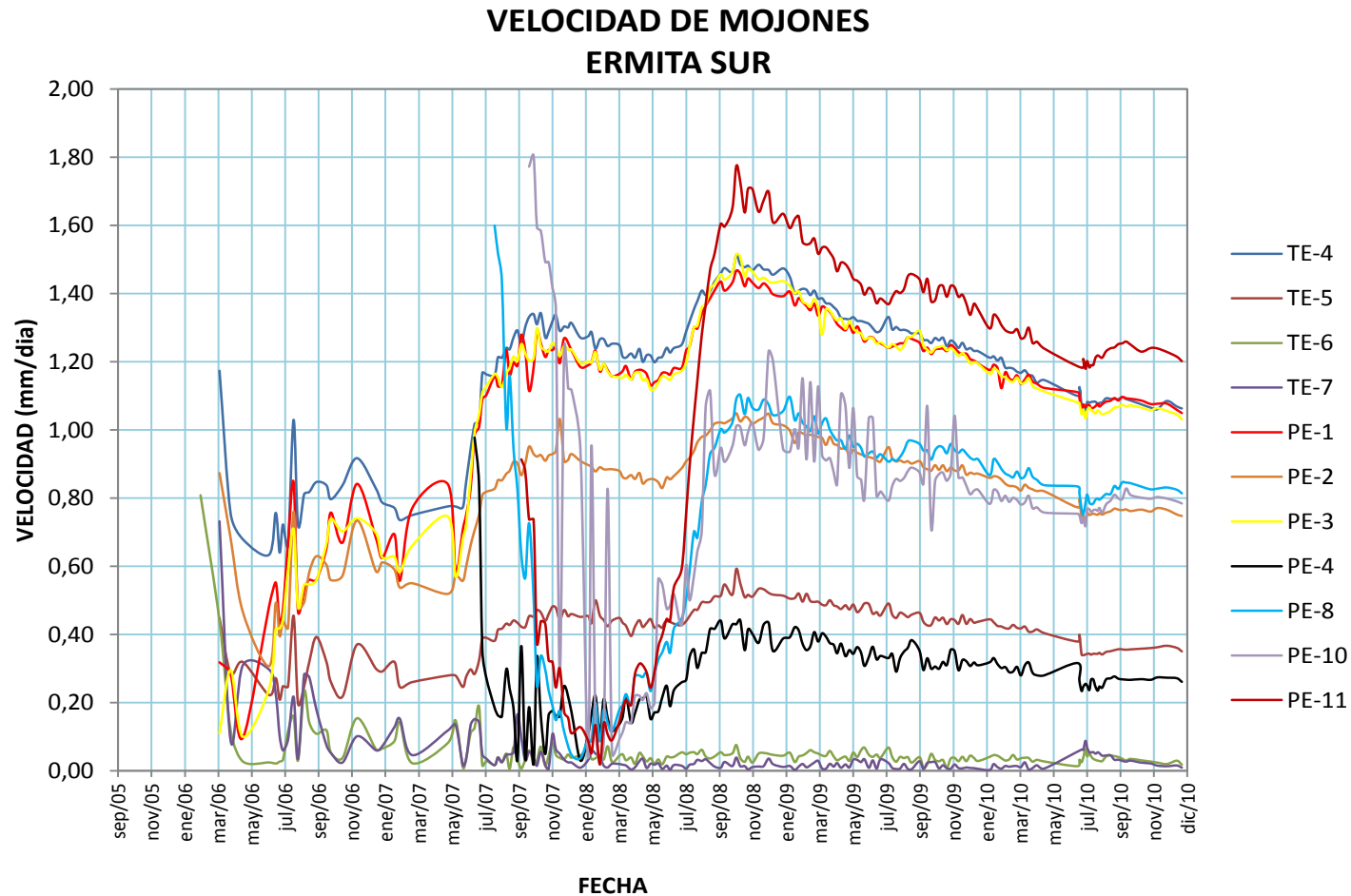


Gráfico 25.- Velocidades registradas en los mojones del primer grupo, monitoreados hasta el año 2010, durante los años 2007, 2008 se registró las velocidades más altas en estos hitos topográficos. Gráfico proporcionado por HIDROPAUTE [15].

VELOCIDAD DE MOJONES (CT) ERMITA SUR

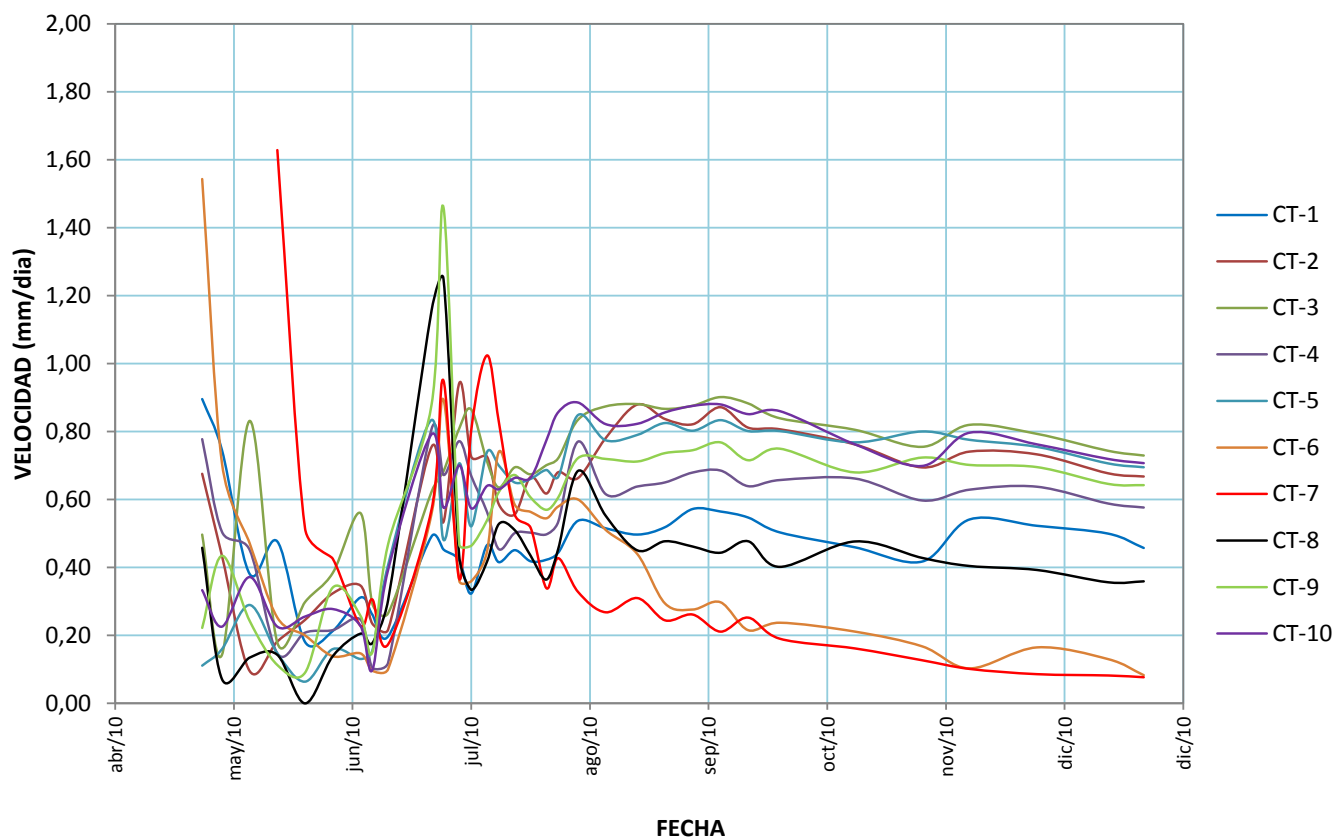


Gráfico 26.- Velocidades registradas en los mojoneros del segundo grupo, monitoreados desde el año 2010, en estos hitos se registró disminución de las velocidades. Gráfico proporcionado por HIDROPAUTE [15].

En el gráfico 27 se observa el promedio del azimut registrado entre todos los mojones colocados en la zona inestable, el mismo se tomó en dirección norte y como eje de referencia la presa.

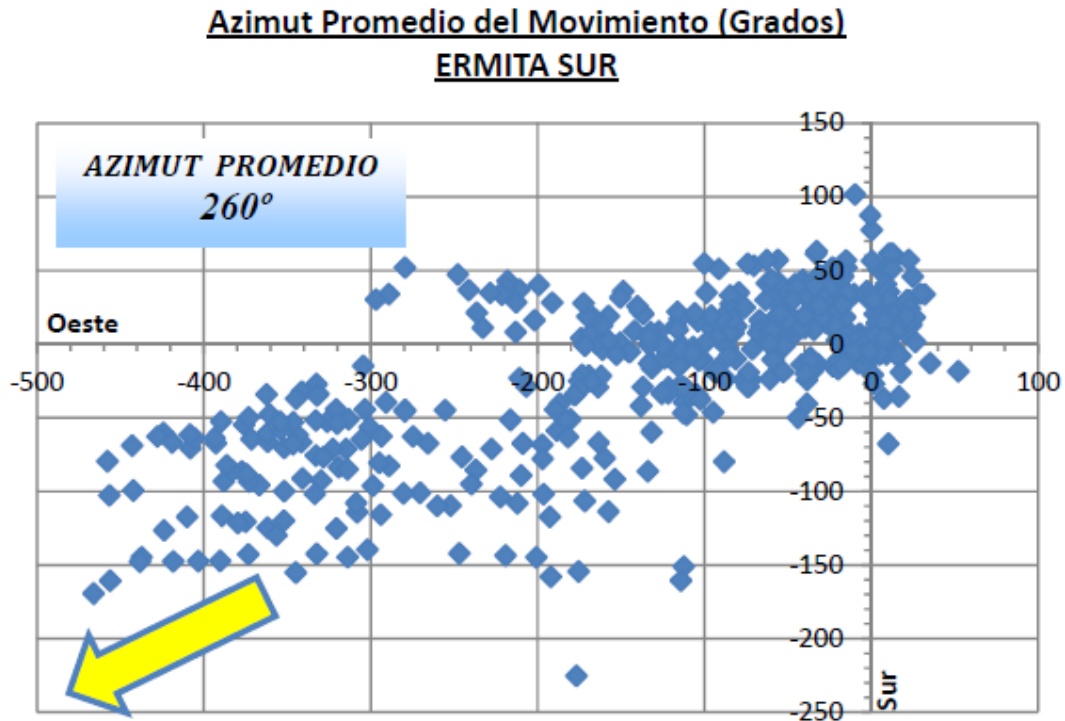


Gráfico 27.- Azimut promedio de movimientos registrados hasta octubre del 2010 en la zona de La Ermita Sur. Gráfico proporcionado por HIDROPAUTE [15].

De este gráfico se concluye que la dirección del movimiento promedio del macizo es hacia el embalse, dirección Sur – Oeste, confirmando que al ocurrir un deslizamiento el movimiento de masa afectaría a la presa Mazar. [15].

4.6 Ensayos de geofísica realizados en la zona

4.6.1 Introducción

La prospección geofísica es una técnica extensiva y complementaria a técnicas directas como son los sondeos, tienen como propósitos determinar las características, geología, geometría de una zona determinada por medio de la correlación de parámetros físicos, de igual forma ayuda a identificar minerales, aguas subterráneas entre otros [16].

Presenta ventajas frente a otros métodos de exploración, ya que permiten abarcar investigación de grandes áreas a un menor costo, los resultados son obtenidos con gran rapidez, pero de igual manera presenta desventajas frente a otros métodos ya que presentan problemas de interpretación, permite estimar propiedades geotécnicas, potencia de los estratos [11].

En el presente trabajo las investigaciones geofísicas se van a tomar como un complemento a los datos de las perforaciones y de instrumentos colocados en la zona en estudio. La recopilación de esta información corresponde al mes de abril del año 2005.

4.6.2 Sísmica de refracción

Los métodos sísmicos se basan en la propagación de ondas sísmicas producidas artificialmente sobre el terreno, estableciendo una correlación con la geología que se tiene en el interior del suelo. La propagación depende de la densidad de cada formación presente en el interior del terreno y de las constantes elásticas. El cambio de las velocidades de transmisión de las ondas sísmicas define el cambio de material en el interior produciendo refracción, reflexión o difracción [4].

La sísmica de refracción se basa en el análisis de la energía que regresa a la superficie del terreno cuando ha encontrado una diferente capa en el interior del suelo [4].

En la superficie se genera una energía que puede ser provocada por una explosión o un golpe, las cuales producen ondas primarias (Longitudinales) conocidas como P, secundarias (Transversales) conocidas como S. La energía generada es registrada en un sismógrafo posterior a la perturbación de los sensores. El tiempo que transcurre en llegar las primeras ondas a los geófonos nos proporciona la velocidad de transmisión y el espesor de los diferentes materiales. Cabe señalar que a medida que los materiales presentan alteraciones la velocidad disminuye, roca más sana mayor velocidad [4].

En la zona en estudio se realizaron 6 perfiles, en la tabla 5 se detallan sus características y las coordenadas de su ubicación, en el anexo 13 se observa el mapa de ubicación de la investigación geofísica. En total son 1.705 m de investigación realizados por sísmica de refracción [6]. En la tabla 7 se observa los resultados de la resistividad eléctrica y su intersección con los perfiles geofísicos realizados.

Numero de Perfil	Código del Perfil	Coord Inic Norte	Coord Inic Este	Coord Final Norte	Coord Final Este	Longitud Total (m)
1	LS – E1	9712562,220	764896,987	9712872,986	764785,940	330
2	LS – E2	9712524,359	764968,768	9712903,046	764937,735	330
3	LS – E3	9712799,055	765002,613	9712705,174	764803,496	220
4	LS – E4	9712644,941	765028,946	9712601,769	764757,364	275
5	LS – E5	9712345,129	764841,697	9712535,434	764952,010	220
6	LS – E6	9712398,929	765010,971	9712536,369	764710,920	330

Tabla 5.- Datos y coordenadas de los perfiles geofísicos realizados en la zona de estudio. Datos proporcionados por HIDROAPUTE y adaptados a la presente investigación [16].

En donde: LS significa Línea Sísmica.
E significa Ermita.

4.6.3 Resistividad eléctrica

La resistividad es una propiedad física de las rocas que depende de la estructura interna, de la litología pero principalmente del contenido de agua. El poder establecer la resistividad de un material en estado natural nos ayuda para diferenciar un material de otro sin necesidad de ensayos de perforación o afloramientos geológicos [4].

Para calcular la resistividad se debe introducir en el terreno una corriente continua con una intensidad determinada, por medio de dos electrodos denominados A y B, los mismos que tiene una fuente de energía. Posteriormente se mide la diferencia de potencial ΔV que se genera en el campo eléctrico como consecuencia de los electrodos de potencial M y N por los cuales pasa corriente.

La resistividad obtenida no es la correspondiente a una litología específica, define el conjunto de materiales involucrados en el paso de corriente por lo cual es una resistividad aparente [4].

Los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), son métodos que se utiliza para obtener información sobre la variación en forma vertical de la conductividad o su inversa que es la resistividad eléctrica y que tiene correlación con el cambio de algunas propiedades físicas de los materiales internos. En esta técnica se separan sucesivamente los electrodos de corriente A y B del punto central en una línea recta y se van tomando medidas de la resistividad en cada posición.

Según se vayan separando los electrodos cuando se obtenga el mayor espesor entre las capas de material esta corresponderá a la resistividad aparente. Por lo general se emplea el método Schlumberger, en el cual la distancia entre los electrodos AM y NB son iguales, mientras que MN es mucho menor que 1/3 de AB [4].

La fórmula de la resistividad aparente es la siguiente:

$$\rho(a) = K \cdot \Delta V / I$$

de donde:

$\rho(a)$ = Resistividad aparente

K = Es la constante de configuración geométrica del dispositivo Schlumberger

ΔV = Diferencia de potencial

I = Intensidad de corriente eléctrica

Número	Código	Longitud AB (m)	Intersección SEV
1	SEV – 01	300	Intersección LS – E1 y LS – E3
2	SEV – 02	300	Intersección LS – E2 y LS – E3
3	SEV – 03	139,24	Intersección LS – E1 y LS – E4
4	SEV - 04	440,2	Intersección LS – E2 y LS – E4

Tabla 6.- Datos obtenidos de la Resistividad Eléctrica y su intersección con los perfiles de sísmica de refracción. Datos proporcionados por HIDROAPUTE y adaptados al presente trabajo [16].

En total se efectuaron cuatro Sondeos Eléctricos Verticales con el dispositivo Schlumberger, con una longitud total de 1179,44 m [16].

4.6.4 Correlación entre la geología y los métodos aplicados

De los ensayos realizados, la información que se obtuvo de los estratos o capas presentes es la que se detalla a continuación [16].

Capa Superficial.- Son suelos poco cohesionados, sueltos, que presentan fragmentos de roca, los espesores son variable según la línea sísmica efectuada.



La LS – E1 presenta variaciones entre 1 y 7 m. La LS – E2 presenta una variación entre 1 y 4 m. La LS – E3 varían los espesores entre 1 y 10 m, pero tiene el predominio de espesores de capa delgados. La LS – E4 espesores delgados varían entre 0 y 4 m. La LS – E5 se presenta irregular, varía entre 0 y 6 m y la LS – E6 al igual que las anteriores predominan capas delgadas presenta variación entre 0 y 14 m, estos valores tienen correspondencia entre la sísmica y resistividad ejercida en la zona, al ser valores altos registrados no se puede asociar a existencia de agua [16].

Segunda.- Esta es similar a la encontrada en la superficie, pero se presenta más compacta, se identifica material coluvial y bloques de roca.

La LS – E1 presenta un espesor que llega a los 27 m, pero con variaciones según avanza, varía desde los 22 m (0 + 110), a los 7 y hasta los 5 m para posteriormente aumentar nuevamente a los 23 m desde la abscisa 0 + 265 m.

La LS – E2 presenta variaciones altas, al inicio presenta espesores de 13 m hasta la 0 + 130, posteriormente se incrementa a 40 m (0 + 210), luego disminuye hasta llegar a los 210 m (0+240) para continuar un espesor similar en adelante.

LS – E3 presenta su mayor grosor en la 0+ 060 llegando a los 38 m y posterior a esto desde la 0 + 090 un espesor regular. La LS – E4 se presenta como capa superficial hasta los 0 + 025, en este tramo tiene un espesor de 18 m presenta altibajos entre las 0 + 050 y la 0 + 130 a partir de este punto presenta un incremento hasta de 30 m y va disminuyendo hasta un espesor de 15 m. La LS – E5 presenta variaciones inicialmente con espesores de hasta 30 m, luego disminuye hasta los 12 m (0 + 090), posteriormente sigue disminuyendo al punto que entre los puntos 0 + 190 y 0 + 200 desaparece para reaparecer con un grosor de hasta 8 m [2].

Finalmente la LS – E6 inicia con espesor de 5 m, desaparece entre la 0 + 015 y 0 + 025, se incrementa hasta los 20 m de grosor y posteriormente presenta ligeras variaciones.

Los valores de resistividad identificados son altos por lo que no es fácil asociar a presencia de agua en cantidades altas. Exceptuando esto la SEV – 04 que se recopiló un valor de 65 (Ω - m), que indica la presencia de agua [16].

Tercera.- De los registros proporcionados se puede asumir que se trata de coluviales conformados por materiales gruesos, también con presencia de roca fracturada o alterada.



En la LS – E1 no se pudo obtener el registro del espesor de la capa.

La LS – E2 presenta variaciones con espesores próximos a los 22 m, en la 0 + 330 aumenta hasta los 70 m de grosor. La principal novedad registrada en esta capa es que se identifican zonas de debilidad laterales.

La LS – E3 tampoco se obtuvo información concreta, lo poco recopilado informa que se trata de una capa de potencia uniforme similar a los 30 m.

LS – E4 presenta una capa regular con un máximo de espesor de 40 m. LS – E5 al igual que la anterior su espesor es regular presentando un promedio de 30 m.

Finalmente la LS – E6 presenta variaciones pequeñas que oscilan entre los 15 y 30 m. En general los valores obtenidos en estas capas son altos por lo cual no se identifica concentraciones importantes de agua [16].

Cuarta.- Al ser el último estrato identificado en esta prospección, no se tiene el espesor de la capa, pero se conoce que se trataría de una roca con poca alteración.

De igual forma los registros de los valores de resistividad son altos por lo cual no presentaría presencia de agua en cantidades altas en esta capa, exceptuando en el cruce entre las LS – E2 y LS – E4 en la cual se ha recopilado un valor de 66 (Ω - m), que indica presencia de agua [16].

De esta información se puede concluir que en la zona en mención se trata de dos capas geológicas compuesta por material coluvial y roca metamórfica, a su vez estas componen cuatro horizontes con sus respectivos espesores.

En la tabla 7 se resume los resultados de los métodos geofísicos aplicados a la zona de estudio [16]. En función de la información recopilada se generó la tabla 8 identificando el material presente en función del espesor registrado.

<i>Capa</i>	<i>Velocidad Sísmica (Vp) m/s</i>	<i>Resistividad Eléctrica (Ω- m)</i>	<i>Características geológicas correspondiente</i>	<i>Espesor registrado</i>
<i>Superficie</i>	<i>300 a 410</i>	<i>339 a 5436</i>	<i>Corresponde a suelo, fragmentos de roca.</i>	<i>0 < e < 14</i>
<i>Segunda</i>	<i>510 a 1100</i>	<i>65 a 165</i>	<i>Material coluvial , bloques medianos, suelo.</i>	<i>0 < e < 30</i>
<i>Tercera</i>	<i>1100 a 1200</i>	<i>54 a 115</i>	<i>Material coluvial grueso, roca fracturada, presencia de agua.</i>	<i>0 < e < 70</i>
<i>Cuarta</i>	<i>2700 a 3600</i>	<i>66 a infinito</i>	<i>Roca sana a poco alterada</i>	<i>desconocido</i>

Tabla 7.- Resultados de la resistividad eléctrica y la sísmica de refracción realizada en la zona de estudio y su correlación con la geología del sector. Datos proporcionados por HIDROPAUTE [16]. Tabla generada a partir de la información recopilada.

El perfil geoelectrico en el área investigada determina la existencia de una máximo de siete capas geoelectricas registradas en los ensayos respectivos, las mismas se pueden observar en el anexo 13. De la recopilación realizada se sabe que la investigación geofísica ha alcanzado una profundidad mayor a los 160 m [2].

4.6.5 Determinación de los módulos elásticos de cada capa

A partir de la relación de las velocidades de onda Vp y Vs se puede obtener los módulos Elásticos Dinámicos de cada capa, los módulos de Young (E), el coeficiente de Poisson (ν), y el módulo de Rigidez (μ) [17].

La velocidad de onda transversal es aproximadamente el 58% de la velocidad de onda Longitudinal para cualquier material sólido, con estos datos y en función de las ecuaciones descritas a continuación podemos determinar los Módulos elásticos [17], [4].

$$\text{Coeficiente de Poisson: } \nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right]}$$

$$\text{Módulo de Young: } E = 2 \mu (1 + \nu)$$

Módulo de Rigidez: $\mu = \rho V_s^2$

Aplicando estas fórmulas se tiene la tabla 8 con los valores correspondientes a los módulos elásticos dinámicos.

Capa	V _p	V _s	μ (Mpa)	V _d	E _d (Mpa)
Superficie	300	174	42	0,3400	113,60
Segunda	510	316	125	0,3200	329,94
Tercera	1100	682	1116	0,3200	2947,03
Cuarta	2700	1782	1263	0,3000	3345,98

Tabla 8.- Estimación de los Módulos Elásticos Dinámicos en función de las líneas sísmicas registradas. Datos proporcionados por HIDROPAUTE [16]. Tabla calculada y adaptada en función de los datos para el presente trabajo.

Para formular la tabla 9 se utilizó la relación de que las Velocidades de Onda secundarias se pueden considerar el 58% de las Velocidades de Onda primaria [17] y el criterio de que las velocidades de onda Vs es aproximadamente dos tercios de las Vp, esto con el fin de variar el Módulo de Young, “Una roca dura con comportamiento frágil presenta mayor módulo de Young y menor coeficiente de Poisson que una roca blanda con comportamiento dúctil” [4]. Por la recuperación de testigos de las perforaciones realizadas y estudiadas anteriormente, consideramos una roca dura en el presente estudio.

En la tabla 10, se observa el módulo Elástico Estático calculado utilizando la relación existente que indica que el elástico es de 1.5 a 2.5 veces el dinámico. Por lo cual para el presente trabajo se utilizó $E = E_d / 2.5$ [17].

En el presente trabajo se va a considerar que en la zona de estudio existentes solamente tres capas geológicas, esto ya que al observar los valores de la resistividad eléctrica y sísmica de cada capa se tiene que la primera capa o superficie es bastante marcada y delimitada, la segunda y tercera los valores son muy similares pudiéndose considerar una sola capa (capa I) y la cuarta (capa II), al ser una capa que se encuentra a una mayor profundidad, constituye una roca sana, por lo cual en la tabla 10 se presenta esta modificación.

Las capas, coeficientes de Poisson y los módulos Elásticos que componen la tabla 9 fueron calculados en función de las fórmulas descritas anteriormente en base a la información proporcionada por HIDROPAUTE

<i>Capa</i>	<i>ν</i>	<i>E (Mpa)</i>
Superficie	0,3400	57
Capa I	0,3200	132
Capa II	0,3000	1338

Tabla 9.- Módulos Elásticos Estáticos calculados presentes en las diferentes capas que conforman el talud en estudio. Datos proporcionados por HIDROPAUTE [16]. Tabla calculada y adaptada en función de los datos para el presente trabajo.



CAPÍTULO V: CARACTERIZACIÓN DEL DESLIZAMIENTO

5.1 Introducción

Una vez que se ha estudiado la información básica de la ladera, el siguiente proceso planteado en la presente investigación es poder caracterizar al deslizamiento La Ermita Sur.

La investigación de un deslizamiento tiene como objetivo principal el conocer toda la información posible sobre las características geológicas, topográficas, geotécnicas, geométricas, geofísicas, ambientales, entre otras que permiten realizar un diagnóstico de la situación actual del movimiento, caracterizándolo y en base al análisis realizado dar la solución más efectiva al problema presentado.

Es así que se debe analizar todos los aspectos relacionados con el área de estudio, buscando información de los movimientos ocurridos en el pasado y analizándolos conjuntamente con el presente.

En regiones como en la cual se da el presente tema de estudio, las lluvias asumen un papel protagónico en la desestabilización de laderas, siendo el agua el factor que más comúnmente se le relaciona con fallas de taludes; esto ya que posterior a lluvias fuertes o periodos de lluvia intensos se observa un mayor incremento en la velocidad de los movimientos, basado en lo expuesto se va a dar una mayor atención en lo referente a la cantidad de agua en la zona, como los datos de las precipitaciones registradas, la evaporación del agua, porcentaje de infiltración, y relacionarlos con los registros de inclinómetros y los piezómetros que se han colocado en el área estudiada.

5.2 Correlación de la información recopilada

Para la determinación de la profundidad a la cual se está produciendo el plano de rotura es muy importante la información que se obtuvo de la geología, de las perforaciones y la instrumentación que se realizó en la zona de estudio, los mismos que correlacionándolos indican que estratigráficamente se tiene dos formaciones geológicas que conforman el material deslizante del talud, la primera un suelo coluvial y la segunda una roca metamórfica alterada y fragmentada, posterior a estas dos capas se presenta una roca más sana sin alteraciones.

Del capítulo IV, al analizar los gráficos 10 y 11, y la información correspondiente a la tabla 11, se puede inferir que existen tres planos de falla, el principal se encuentra a una mayor profundidad comprendida entre los 1,5 m en unas perforaciones y los 62 m como es el caso de la perforación PE – 8, cuya localización es en la zona crítica del deslizamiento.



De igual manera el contacto geológico se ubicó desde los 2 m hasta los 29 m como es el caso de la perforación PE – 2.

Analizando la información de las profundidades, tanto del plano de falla como del contacto se puede concluir que el movimiento de la masa inestable atraviesa el estrato superficial del coluvión y parte del macizo rocoso.

Los ensayos de geofísica ayudaron a identificar el contacto entre el coluvión y la roca fracturada, esto se realiza por medio de la frontera sísmica, dividiendo las capas geofísicas de diferente valor, la capa superficial tiene velocidades sísmicas menores a los 500 m/s, según los registros de perforación corresponden al coluvial.

En la tabla 10 se realizó una correlación entre los resultados de las perforaciones con la geología y los estratos que existen en la zona, identificando un plano de falla principal que es el que se extiende a lo largo del talud y atraviesa el contacto coluvión roca y planos de falla secundarios que se extienden en menor longitud en el talud.

PERFORACION	PROFUNDIDAD DE PLANOS DE FALLA LOCALIZADOS	PROFUNDIDAD DE CONTACTO GEOLOGICO	UBICACIÓN DE PLANOS DE ROTURA Y SU CORRELACION CON LA GEOFISICA	CORRELACION CON LA GEOLOGIA	OBSERVACIONES
PE - 1	Registra plano de falla a aproximadamente a 18 metros	16 metros	Corresponde a Capa I	Sub Unidad La Ermita	Plano de Falla principal
PE - 2	inclinómetro registro planos de rotura a los 24 y 52 metros de profundidad	29 metros	Corresponde a Capa Superficie y Capa I	Depósito Coluvial y Sub Unidad La Ermita	Se registró de dos planos de falla el de mayor profundidad es el principal
PE - 3	inclinómetro registro planos de rotura a los 17, 27 y 32 metros de profundidad	19 metros	Corresponde a Capa Superficie y Capa I	Depósito Coluvial y Sub Unidad La Ermita	Se registró tres planos de falla los dos primeros secundarios el tercero el principal
PE - 4	Se registran planos de falla aproximadamente a los 2 y 7 metros	12 metros	Corresponde a Capa Superficie	Depósito Coluvial	Planos de Falla secundarios
PE - 8	inclinómetro registro planos de rotura a los 30 y 62 metros de profundidad	21 metros	Corresponde a Capa Superficie y Capa I	Depósito Coluvial y Sub Unidad La Ermita	Se registró de dos planos de falla el de mayor profundidad es el principal
PE - 10	inclinómetro registro planos de rotura a los 9, 17 y 38 metros de profundidad	18 metros	Corresponde a Capa superficie	Depósito Coluvial	Se registró tres planos de falla los dos primeros secundarios el tercero el principal
PE - 11	inclinómetro registro planos de rotura a los 21 metros de profundidad	Sin información	Corresponde a Capa Superficie y Capa I	Depósito Coluvial y Sub Unidad La Ermita	Se registró plano de falla secundario
EIN - 1	No se registra plano de falla	2 metros	Sin información	Depósito Coluvial	Sin Registro
EIN - 4	inclinómetro registro planos de rotura a los 31,5 metros de profundidad	33 metros	Corresponde a Capa Superficie y Capa I	Depósito Coluvial y Sub Unidad La Ermita	Se registró plano de falla principal
EIN - 5	inclinómetro registro planos de rotura a los 16,5 metros de profundidad	17 metros	Corresponde a Capa Superficie y Capa I	Depósito Coluvial y Sub Unidad La Ermita	Se registró plano de falla secundario
EPZ - 1	Registra plano de falla aproximadamente a los 8 metros	8,7 metros	Corresponde a Capa Superficie	Depósito Coluvial	Plano de Falla principal
EPZ - 2	No se registra plano de falla	4,4 metros	Sin información	Depósito Coluvial	No registra plano de falla
EPZ - 3	Plano de falla registrado aproximadamente a 1,50 metros	7 metros	Corresponde a Superficie	Depósito Coluvial	Se registra plano de falla principal
EPZ - 4	Plano de falla registrado aproximadamente a los 21 metros	21,9 metros	Corresponde a Capa Superficie	Depósito Coluvial	Se registra plano de falla secundario

Tabla 10.- Correlación entre las perforaciones realizadas, la geología y la geofísica de la zona de estudio. Información proporcionada por HIDROPAUTE, tabla realizada y adapta al presente trabajo.

5.3 Características del material

Como se acotó anteriormente, La Ermita Sur estratigráficamente se compone de dos unidades, las mismas que están expuestas a un proceso de meteorización intenso, por lo cual cada unidad se comporta de maneras diferentes cuando son atacadas por los diversos factores climatológicos.

Las rocas que conforman la unidad Aloe – Paute son meteorizables fácilmente por los agentes atmosféricos lo que provoca suelos residuales limosos, la inestabilidad que afecta a estos suelos residuales al igual que la descompresión de la roca forman los coluviales.

5.3.1 Características de los coluviales

Estos son depósitos de ladera, producidos por deslizamientos o desprendimientos de roca o suelo, también se los ha definido como “masas incoherentes de materiales sueltos y heterogéneos, de suelo o fragmentos de roca depositados por lavado de la lluvia, reptación o deslizamientos, los cuales comúnmente se depositan en la base de las laderas” [9].

Los coluviones presentes en el deslizamiento, en base a las perforaciones registradas y estudiadas, se concluye que se encuentran localizados entre la superficie natural del terreno y el contacto con la Unidad de rocas La Ermita. Están conformados por materiales detrítico y fino granular, producidos por la meteorización y la erosión de los macizos rocosos. En la parte superior se puede observar un coluvión fino, constituido principalmente por fragmentos angulares y subangulares soportados por una matriz limo arcillosa plástica, con una coloración café amarillenta y fragmentos angulosos de roca metamórfica; a continuación se observa una capa de coluvial grueso, constituida por bloques o fragmentos angulares y subangulares de cuarcitas, metavolcánicas, esquistos cuarcíticos, micáceos presentan caras oxidadas, al igual que el coluvial fino la matriz es limo arcillosa plástica. El material detrítico está constituido por bloques angulares y subangulares de esquistos y fragmentos de cuarzo, envueltos en una matriz de consistencia blanda y cohesiva, presenta una alta plasticidad, este material está presente en porcentajes que oscilan entre el 40% y el 60% [18].

Se puede observar en zonas cercanas al pie del área inestable pequeñas vertientes de agua que brotan desde la roca, lo cual es un indicador de que el nivel freático en ciertos puntos llega al contacto coluvión – roca.



Al tener como base del coluvión una roca metamórfica, esta actúa como un plano de falla, presentando canales internos lo cual facilita al movimiento del material. El espesor de esta formación es variable en las diferentes perforaciones revisadas, pero para el perfil a utilizarse se considera un promedio de 30 m de profundidad.

En base a las visitas de campo efectuadas, se observó que una de las características de la zona donde aflora este material es su poca o nula vegetación aportando a la inestabilidad. Las raíces afectan de una manera positiva a la estabilidad del coluvial ya que lo anclan al suelo base, uniéndolo y aumentando la resistencia al cortante del suelo. Al tener una alta vegetación se logra mantener el contenido de agua en la superficie y hacer que trabajen como una sola masa fortaleciendo el suelo, pero sin duda alguna que para obtener estos resultados depende de la especie vegetal que se encuentre en el área afectada [9].

5.3.2 Características del macizo rocoso unidad La Ermita

En un macizo se considera el hecho de que el fallo de estabilidad en un talud está determinado por su estructura geológica, sus diaclasas, planos de foliación, planos de fallamiento, en este caso se va a considerar a más del fallo del talud por sus estructuras, el fallo del talud total por el contacto entre las dos estratigrafías ya que las resistencias al corte son diferentes.

Posterior al depósito coluvial se localiza el macizo rocoso, principalmente constituido de Esquistos Cuarzo – Micáceos, Esquistos Micáceos, Esquistos Cuarzo – Cloríticos, Cuarcitas y Cuarcitas Esquistosas, y Cuarcitas Masivas y Esquistosas [18], que presentan un alto grado de foliación y cizallamiento, posiblemente producto de pliegues, movimientos gravitacionales, descompresiones.

Al igual que el coluvión en esta unidad geológica los agentes atmosféricos han moldeado su forma, presentando un grado de meteorización alto. En base al Capítulo III, la información recopilada de los ensayos Lugeon indican que la permeabilidad de la roca disminuye con la profundidad, variando la roca de muy fracturado a fracturado, llegando a la roca sana casi impermeable a partir de los 90 m de profundidad, perforación PE- 8 del capítulo IV.

5.3.3 Humedad y niveles freáticos identificados en la zona

En la zona en estudio, como se observa en la tabla 4, la información de los sondeos realizados y su informe emitido en julio del 2007, se concluye que la profundidad a la cual se encontro el nivel freático en diferentes puntos de la zona deslizada, es la siguiente [8].



- Sondeo PE-1: Profundidad ubicacion NF 38 m.
- Sondeo PE-2: Profundidad ubicacion NF 80 m.
- Sondeo PE-3: Profundidad ubicacion NF entre 70 a 80 m.
- Sondeo PE-4: Profundidad ubicacion NF 35 m.
- Sondeo PE-8: Profundidad ubicacion NF 62 m.
- Sondeo PE-10: Profundidad ubicacion NF 29 m.
- Sondeo PE-11: Profundidad ubicacion NF 42 m.

La profundidades del nivel se verifican en la tabla 4, de esto se infiere que según la época climática predominante en la zona de estudio, medido a partir de la superficie del terreno, se encuentra la posición del nivel freático entre los 30 m y 80 m de profundidad, el promedio adoptado es 62 m de profundidad, este es asumido del sondeo PE – 8, por su ubicación central en la zona en estudio.

Cuando el nivel freático aumenta se generan mayores movimientos, esto se puede correlacionar en función de la velocidad de desplazamiento de los mojones en función de las precipitaciones analizados en el capítulo anterior.

A este movimiento se lo puede clasificar como activo con presencia de zonas húmeda [9], ya que al pie de la masa coluvial en el contacto coluvion/roca se observa una zona saturada que tiene una pequeña vertiente que brota del coluvial. En muchas partes la zona se caracteriza por una nula vegetación, compuesta por surcos causados por fenómenos erosivos. Al ser esta una ladera con pendientes pronunciadas la erosión favorece al movimiento ya que se presenta una masa coluvial saturada lo que crea una pérdida de soporte en la base del coluvión, generando una baja resistencia al corte y por ende el movimiento.

5.4 Parámetros geométricos del deslizamiento

5.4.1 Introducción

La topografía del talud tiene una incidencia directa en su comportamiento ante el movimiento posible que pueda generarse por efectos de la gravedad o por esfuerzos totales que actúan directamente sobre el material. Datos básicos como altura, largo, ancho, pendiente, curvatura que tiene el talud, es de mucha importancia ya que da una guía para el control de la escorrentía superficial, de la infiltración y el movimiento de agua a través del talud, todas estas características van a influir el porcentaje de agua que se infiltra y por ende los niveles freáticos que se encuentran en el interior de la formación.



5.4.2 Geometría de La Ermita Sur

Es muy importante considerar la geometría de la ladera y su pendiente ya que el movimiento debajo de la masa deslizada es condicionado por estos parámetros. El rodamiento influye en la energía a desarrollar por la masa en movimiento y en su alcance de longitud y por tanto en su capacidad destructiva [9].

La corona de este deslizamiento se ubica aproximadamente en la cota 2650 msnm sobrepasando la carretera Cuenca – Guarumales, ubicada en la cota 2530 msnm, su escarpe principal se localiza a la altura de la cota 2490 msnm y la base se localiza aproximadamente en la cota de los 2170 msnm. La altura de estudio de la Ermita Sur se la calcula en 320 m (altura entre escarpe principal – base). Desde la ubicación del escarpe principal hasta la altura de la cota 2300 msnm se puede apreciar una pendiente no tan pronunciada que bordea los 30° a 40°, posterior a esta elevación se aprecia a causa de deslizamientos antiguos un cambio de pendiente con una inclinación mayor a los 60°.

La longitud de recorrido del agua desde la corona hasta la base es de aproximadamente 700 m. El ancho de estudio para el movimiento se lo considera en 200 m en base los ensayos de geofísica realizados en la zona. La longitud total (distancia longitudinal aproximada desde la base al escarpe principal) considerado para el estudio se aproxima a los 520 m. La curvatura que toma este movimiento es del tipo cóncavo, lo que sumado con la longitud de recorrido del agua aumenta el grado de infiltración y erosión en el suelo de este deslizamiento [3].

5.4.3 Volumen de material estimado en el deslizamiento.

El volumen de la zona en estudio se calcula próxima a los 104.000 m² (ancho de estudio por la longitud total), esto, considerando que los mayores indicadores de movimiento encontrados en la zona visitada como por ejemplo grietas, deslizamientos superficiales, reptaciones, asentamientos del terreno, se concentran alrededor de los 2200 msnm y 2400 msnm, dan una superficie aproximada de material afectado por el movimiento cercano a los 90000 m² y con un espesor promedio de 20 m de material deslizando el volumen total en movimiento se estima en 1'800.000 m³ de material .

El espesor promedio se consideró en base al registro de perforaciones y a los resultados de la geofísica, en el cual el espesor de la capa coluvial varía entre 0 y 30 m de profundidad considerados desde la superficie del talud.

Para el cálculo del volumen deslizado se utilizó la fórmula para deslizamientos traslacionales [9]:



$$V = L \times W \times D$$

De donde

L= Longitud de la masa a movilizarse = 520 m

W= Ancho de la masa a movilizarse = 200 m

D= Espesor de la masa inestable = 20 m

Cabe señalar que este deslizamiento ha sido catalogado para el Proyecto Hidroeléctrico Mazar como un deslizamiento latente de peligrosidad media [3]. La Peligrosidad es función de la Intensidad y la probabilidad de ocurrencia del fenómeno.

La intensidad depende de la magnitud del terreno y de la clasificación del movimiento (en este caso deslizamiento), la probabilidad toma en cuenta el grado de ocurrencia que es función de varios parámetros antrópicos y geológicos obtenidos en el campo. Estos parámetros han sido tomados del Informe Final del Proyecto Hidroeléctrico Mazar, emitidos por SWECO y son calificados y ponderados en una matriz dando una valoración entre 0 y 1, de la cual se obtuvo lo siguiente:

Parámetros para calificar el grado de Intensidad en La Ermita Sur:

A	=	alta (0,66 a 1,00)
M	=	media (0,33 a 0,66)
B	=	baja (0,00 a 0,33)

Si bien es cierto que la calificación de la peligrosidad puede tener un grado de subjetividad, debido a la evaluación de la probabilidad, no es menos cierto que la información sobre el fenómeno y su magnitud es una herramienta importante para evaluar y manejar los terrenos inestables en el embalse [3].

Para el talud La Ermita Sur, el informe lo clasifica como:

$M_{DMM} - M$ (Media): grado de peligrosidad resultante de donde:

D: tipo de fenómeno en este caso Deslizamiento;

M: la calificación de la probabilidad, en este caso Media y

M: la calificación de la intensidad, en este caso Media.



5.5 Modelo geológico del deslizamiento

5.5.1 Estado de actividad del movimiento

La Ermita Sur es un antiguo deslizamiento cuyo origen se le puede atribuir inicialmente a la apertura del valle del Paute y reactivado nuevamente a causa del desfogue de La Josefina producido en el año de 1993. Basándose en la morfología del sitio se infiere que este deslizamiento ha tenido anteriormente movimientos importantes a lo largo de su historia. Actualmente, este deslizamiento se lo clasifica como reactivado mostrando su movimiento desde algunos años atrás presumiblemente a más del desfogue por acción de los intensos periodos lluviosos que afectan a la zona, por acción de explosiones realizadas durante el proceso de construcción de la presa y por la escasa vegetación que provoca que el material coluvial sea fácilmente erosionado.

5.5.2 Tipo de movimiento

Dentro de las características que se observan de este movimiento se puede anotar las siguientes:

- Por los deslizamientos ocurridos anteriormente y en base al movimiento actual, se puede observar que este se da hacia abajo y hacia afuera a lo largo de una superficie que presenta una ligera ondulacion y sin presentar una tendencia de giro hacia atrás [9], esto esta correlacionado con el azimut del movimiento gráfico 27.
- A causa de la pendiente, el deslizamiento tiende a seguir acomodandose conforme el paso del tiempo, es decir tiende a autoestabilizarse buscando un equilibrio de fuerzas [9].
- La rotura que se dá, según lo acotado, tiene presencia en las primeras capas y en el contacto entre los diferentes materiales [4].
- Existe una saturación del terreno en ciertas cotas [11].
- En los afloramientos rocosos a más de la desintegración que se observa, también se aprecia un grado de humedad, esto por acción del nivel freático [11].
- En ciertas partes se observa la intercalación de estratos entre competentes e incompetentes [9].

- Por acción de la erosión, en varias zonas se observa la matriz del coluvión presente, esta a su vez provoca un movimiento lento de todo el material [9].
- En épocas de intensa lluvia se observa una aceleración del movimiento, esto se puede concluir por la correlación existente entre los equipos de monitreo y los registros de lluvia.
- En este movimiento se pueden ver involucrados volúmenes grandes y pequeños de material que se acumulan en el pie [9].
- La presencia de materiales heterogéneos en toda la zona de análisis [9]
- Presencia de grietas verticales en el escarpe principal [9].
- Se da entre el suelo y la roca, [4].

Analizando todas las características de este movimiento en masa y en base a lo expuesto anteriormente, este movimiento se lo clasifica principalmente como un ***deslizamiento del tipo Traslacional***. También en este movimiento se puede encontrar reptaciones, deslizamientos superficiales, asentamientos del terreno por lo cual se lo puede en base a la información recopilada de Análisis Geotécnico, Deslizamientos de Jaime Suárez se lo puede clasificar como de estilo complejo.

5.5.3 Velocidad del movimiento

La velocidad con la que se mueven los deslizamientos puede ser obtenida en base a los datos de monitoreo de extensómetros, inclinómetros, entre otros, cuyos registros de movimiento deben ser de un periodo mínimo de dos años para poder clasificarlos dentro de las velocidades de movimiento establecidas en la tabla 14 [4]. De esta clasificación se puede concluir con una velocidad de movimiento Lenta.

La primera clasificación que se realizó de este movimiento en el informe presentado en julio del 2007, del análisis de la instrumentación instalada se pudo clasificar a este movimiento en base a su actividad como activo o lento con fases rápidas, cuya velocidad es mayor a los 10 cm/año [14].

De la información de la instrumentación instalada, se observa que la velocidad de movimiento, en varios de los hitos registran movimientos superiores a las 12 cm/año, confirmando lo indicado en el informe de julio del 2007.

La clasificación de la tabla 11, se la realiza en base a la intensidad del desplazamiento el cual se basa es una correlación entre el volumen desplazado y su velocidad en la cual los colores indican su intensidad [11].

Alto (A): Rojo

Media (M): Anaranjado

Bajo (B): Celeste

Muy Baja (MB): Verde

INTENSIDAD DEL DESLIZAMIENTO			
VOLUMEN (m³)	VELOCIDAD (cm / año)		
	> 10	2 a 10	< 2
> 100000	Alta	Alta	Media
50000 - 100000	Alta	Media	Baja
5000 - 50000	Media	Baja	Muy Baja
< 5000	Baja	Muy Baja	Muy Baja

Tabla 11.- Intensidad del desplazamiento, volumen vs. velocidad. Adaptado de SUAREZ, Jaime.: Deslizamientos, ANALISIS GEOTECNICO, Capítulo I, [11].

Analizando esta tabla de velocidad en función del volumen desplazado, se concluye que la velocidad de movimiento en el deslizamiento La Ermita Sur es **lenta** con una alta intensidad.

La **intensidad** de los derrumbes es medida a partir de la energía cinética o que es similar al potencial de daño que tiene el movimiento y que es generada por el suelo deslizado. Su potencial de daño puede ser asociado a su capacidad de alcance (esto en función de la altura y pendiente del talud y al volumen de la masa en movimiento) [11].

De la información recopilada del año 1998 se obtuvo que este movimiento fue clasificado como deslizamiento con una probabilidad e intensidad media. Comparando estos datos con la clasificación actualizada la intensidad de movimiento ha variado de media a alta. Por lo cual actualmente se lo puede catalogar como un movimiento reactivado, lento con una alta intensidad.

5.6 Análisis de la masa en movimiento

En base a los datos obtenidos por medio de las investigaciones y mediciones realizadas en la zona estudiada, se han elaborado perfiles geológicos que se observan en los gráficos 28 y 29, en los cuales se puede apreciar que la principal superficie de deslizamiento tiene la forma semicircular; esta atraviesa al coluvión superficial y una parte del macizo rocoso.

La masa inestable identificada está conformada por el coluvión, la misma que se mueve en la misma frecuencia de una masa de roca fracturada subyacente. Estas dos unidades están separadas del macizo rocoso competente por la superficie de deslizamiento principal.

La superficie de rotura se desarrolla en la capa I, las superficies secundarias en los estratos del coluvión y la roca fracturada. Si bien existen sistemas de discontinuidades presentes en la zona cuya orientación es a favor de la pendiente no es muy probable que el movimiento sea causado por estas ya que la roca sana no presenta problemas por lo cual se descartan como generadoras de movimiento, esta observación está respaldada también en el hecho de que en los coluviones deslizados no se observa macizo rocoso.

Se puede señalar que solamente una parte de la superficie de deslizamiento se encuentra bajo el nivel freático, por lo cual es factible asumir que la influencia de las masas saturadas no es tan elevada aunque sí importante para contribuir con la estabilidad.

Dentro de los factores desencadenantes que provocan el movimiento se puede concluir que el problema primordial en la estabilidad de este talud es la posición del nivel freático presente en él talud, ante lo cual en la modelización que se va a realizar, tendrá mayor énfasis en considerar los parámetros que se vean afectados por los fenómenos de infiltración.

5.6.1 Perfil asumido para la modelación

En base a los resultados de la instrumentación, se eligió al Perfil B – B. este es el nombre dado por HIDROPAUTE y que se mantiene en la presente investigación, como el representativo de lo que está ocurriendo en el talud, para tal efecto se consideró lo siguiente:

- La resultante de los vectores de movimiento dados por los inclinómetros en los registros indican que el movimiento es hacia el embalse en el sentido sur – oeste.

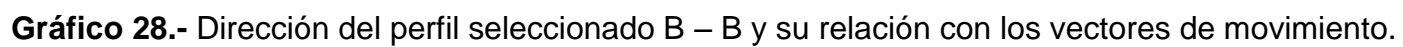


- El perfil más crítico en un talud es el que se encuentra en la zona de mayor pendiente, para nuestro caso, el perfil cruza la zona de mayor movimiento del talud.
- El perfil seleccionado pasa por el inclinómetro PE – 8 y por la perforación PE – 11, generando una proyección podemos utilizar la información del piezómetro EPZ – 3 y los Inclinómetros PE – 2, EIN – 4. Siendo este el que tiene mayor información disponible de lo que ocurre en el talud.
- Este perfil pasa por la zona de mayor movimiento de los hitos colocados, esto se lo puede observar en el anexo 11.

En función de los puntos mencionados y en base a la información proporcionada por HIDROPAUTE, el perfil seleccionado guarda relación entre los datos por lo cual se asume el mismo para el presente trabajo.

El gráfico 29 se observa el perfil elegido para la modelación, en el mismo es posible apreciar la profundidad a la cual se encuentra el nivel freático en esta zona de la ladera.

En el gráfico 30 se observa las capas registradas como estratos en esta zona del talud, identificándose el plano de falla principal que se da en el segundo estrato identificado.



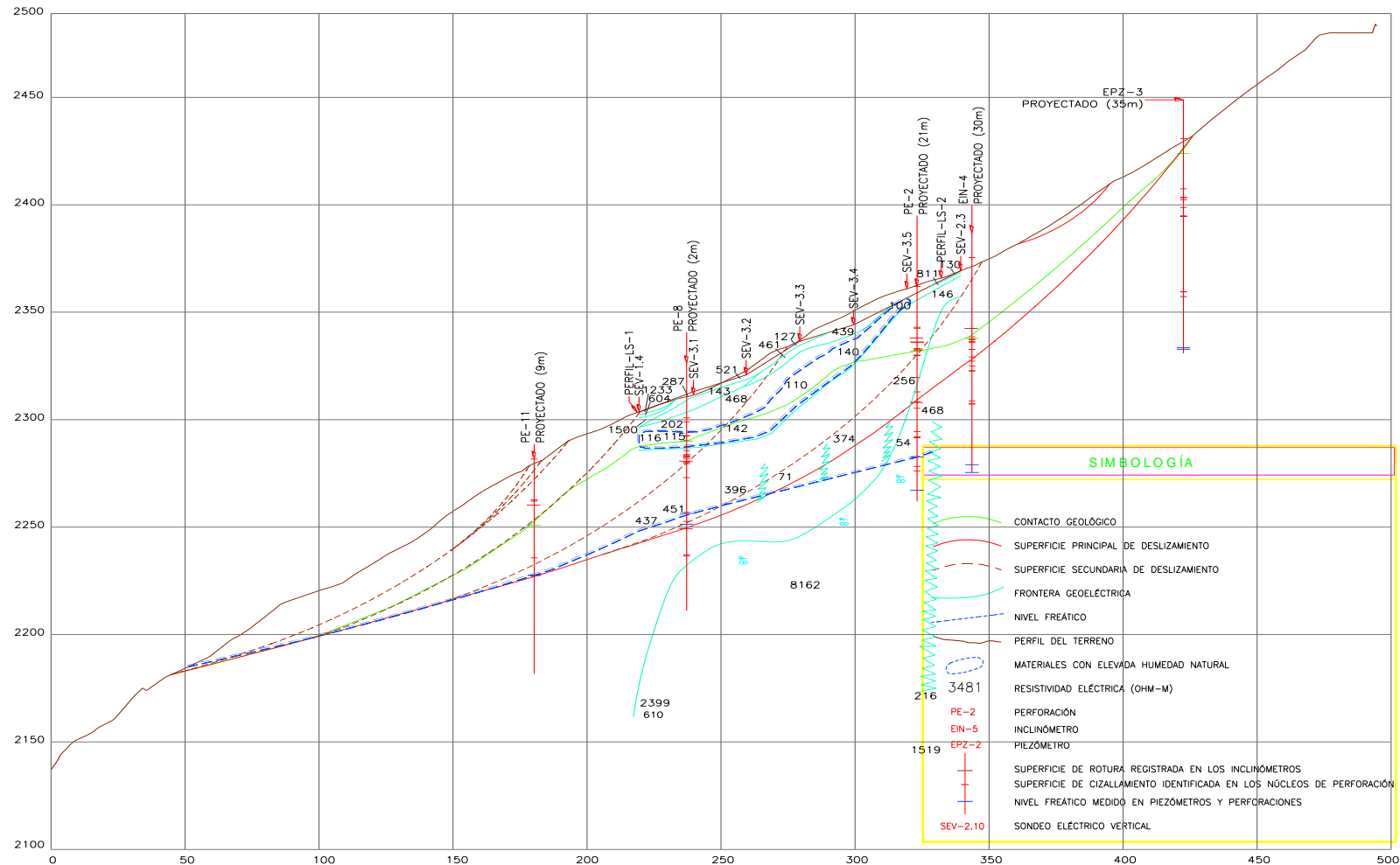


Gráfico 29.- Perfil B – B proporcionado por HIDROPAUTE y elegido para la modelación en el presente trabajo. En este perfil se observa el nivel freático presente en la zona representado con línea azul, adicional se ubica materiales con elevada humedad. La línea verde es el contacto, la línea roja la superficie de falla principal.

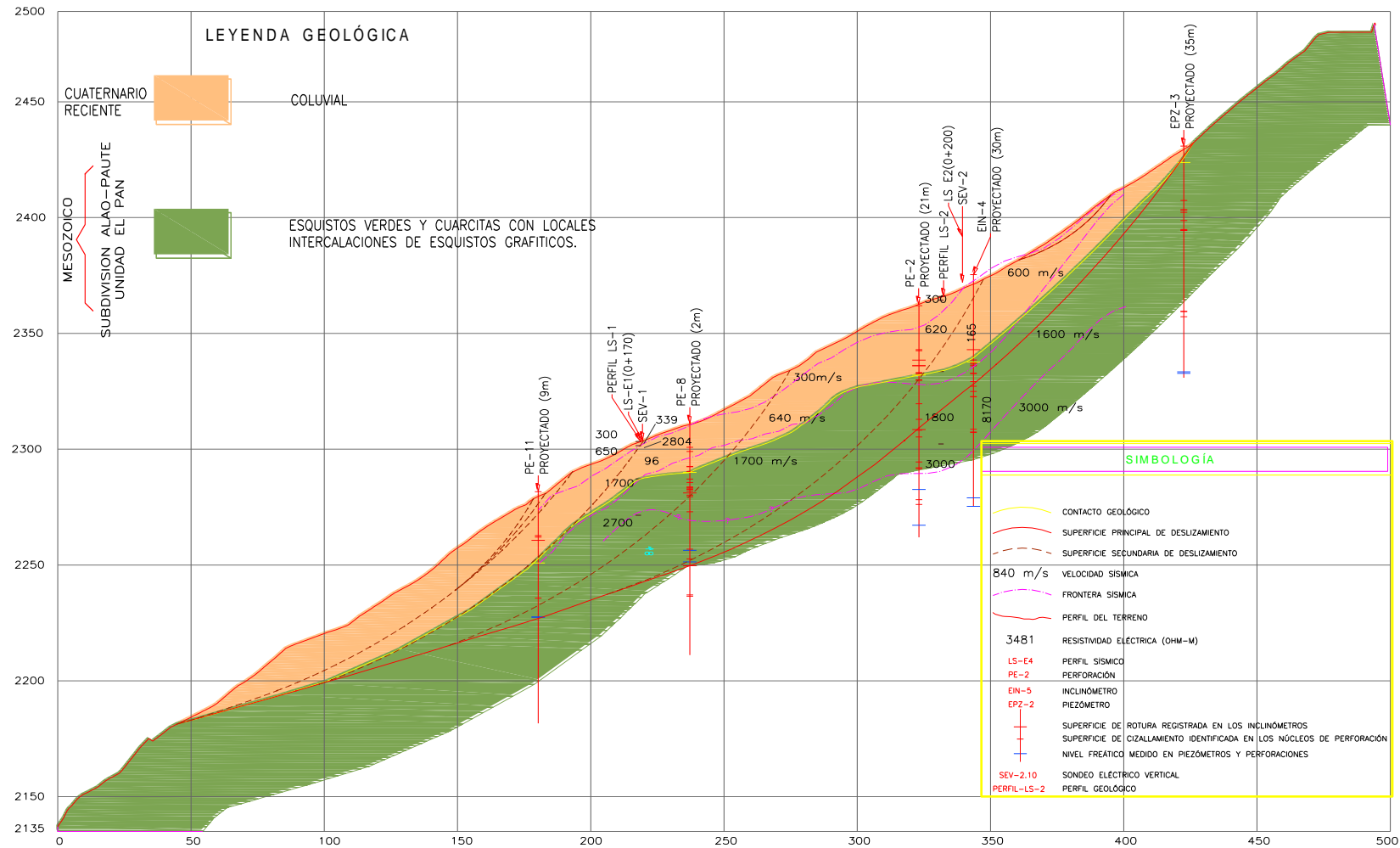


Gráfico 30.- Perfil B – B, en este gráfico observamos las capas de material coluvial y roca fracturada localizada en la zona de estudio, de igual forma se aprecia la superficie principal de deslizamiento que atraviesa los dos estratos. Se observan las perforaciones y geofísica realizadas en la zona, superficies de falla secundarias. Perfil proporcionado por HIDROPAUTE.



5.7 Caracterización del macizo

5.7.1 Introducción

En esta sección se abarcan temas relacionados a la caracterización geomecánica del macizo en estudio y la determinación de los parámetros geomecánicos que interfieren en las diferentes capas de materiales involucrados en el deslizamiento.

Las propiedades de la matriz rocosa, descripción y medidas de las características, al igual que sus discontinuidades y sus parámetros resistentes, ayudan para una evaluación global del macizo rocoso. Con esta información, las clasificaciones geomecánicas permiten valorar la calidad y los parámetros geotécnicos en términos de: resistencia a la compresión simple (σ_c), cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (ϕ) que tiene el macizo, adicional es necesario conocer cómo actúa en base a los procesos tenso – deformacionales a los que está sujeto el macizo, por lo cual los parámetros requeridos: módulo de elasticidad (E) y coeficiente de Poisson (ν) [4].

5.7.2 Clasificación del macizo

El comportamiento mecánico del macizo está influenciado por diferentes factores que influyen de manera directa y determinan su clasificación:

- Propiedad de la matriz rocosa
- Discontinuidades, su tipo y características
- Alteración y meteorización a la que está expuesto el macizo
- Presencia de agua, (niveles freáticos)
- Estado tensional

Los macizos rocosos al ser de tipos discontinuos tienen un grado de complejidad geomecánico, esto permite que sean estudiados y clasificados de acuerdo a su aplicación, por este motivo las clasificaciones geomecánicas creadas generan índices de calidad de los macizos relacionados con los parámetros geomecánicos y con el medio en el cual se desarrollan, como en este caso taludes [4].

Las clasificaciones geomecánicas más utilizadas son la RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski y la Q de Barton, que proporcionan diversos grados de calidad del macizo en función de las discontinuidades presentes y de la matriz rocosa, que proporcionan valores estimados de su resistencia [4].

En el presente trabajo, estos valores fueron calculados y proporcionados por HIDROPAUTE, en función de las perforaciones realizadas, utilizando el método de compresión uniaxial que entrego los parámetros resistentes a la compresión en el macizo.

5.7.3 Clasificación geomecánica de Bieniawski

Esta clasificación que tiene como finalidad relacionar parámetros geotécnicos con índices de calidad, fue desarrollada por Bieniawski en el año de 1973, y considera los siguientes parámetros geomecánicos [4].

- Resistencia a la compresión uniaxial de la matriz rocosa.
- Índice RQD (Rock Quality Designation) que depende del grado de fracturación.
- Espaciado de las discontinuidades.
- Condición de las discontinuidades.
- Características hidrogeológicas de la zona.
- Orientación de las discontinuidades en la perforación.

El índice de RMR puede variar entre 0 y 100 y define cinco clases de roca designadas con números romanos que se corresponden con cinco calidades del macizo rocoso: muy buena, buena, media, mala y muy mala [4]. En la tabla 12 se observa la clasificación del macizo.

Clase	Calidad	Valoración RMR	Cohesión	Angulo de rozamiento
I	Muy Buena	100 - 81	$> 4 \text{ Kg / cm}^2$	$> 45^\circ$
II	Buena	80 - 61	$3 - 4 \text{ Kg / cm}^2$	$35^\circ - 45^\circ$
III	Media	60 - 41	$2 - 3 \text{ Kg / cm}^2$	$25^\circ - 35^\circ$
IV	Mala	40 - 21	$1 - 2 \text{ Kg / cm}^2$	$15^\circ - 25^\circ$
V	Muy Mala	< 20	$< 1 \text{ Kg / cm}^2$	< 15

Tabla 12.- Clasificación del macizo rocoso en función del índice RMR (Adaptado de Gonzáles Vallejo, et. al [4]).

Los sondeos realizados en el talud, específicamente la perforación PE – 8 que está dentro del perfil seleccionado, en la zona de mayor movimiento, de la recuperación de testigos en función de la puntuación, se identificó la roca metamórfica conformada por 10 variedades que se diferencia por su litología y características geotécnicas, las mismas se observan en la tabla 16, su relación con el índice RMR y su ubicación con la capa asumida en el presente trabajo. En el contacto entre la capa B5 y B6 se desarrolla el plano principal de rotura.

En la tabla 13 se observa los diferentes estratos identificados en el talud, su clase, clasificación y su agrupación con las capas asignadas al talud. La fila resaltada con color anaranjado representa el estrato por el cual se da el plano de falla en la ladera. De igual forma, las capas agrupadas se identifican por su coloración verde, la más clara corresponde a la Capa I.

PERFORACION PE- 8 TESTIGOS ESTRATO TIPO B ROCA METAMORFICA (21,15 - 100,00 m) E = 78,85				
CLASIFICACION HIDROPAUTE	DESCRIPCIÓN	CLASE	RMR	CAPA AGRUPADA
B1	Esquisto Cuarzo micáceo (21.15 m - 25,50 m) E = 4,35 m, muy fracturado, ligeramente meteorizado	MEDIA	60 - 81	CAPA I
B2	Esquisto Cuarzo micáceo (25,50 m - 33,00 m) E = 7,50 m, fracturado, medianamente meteorizado	MEDIA	60 - 81	
B3	Esquisto Micáceo (33,00 m - 40,00 m) E = 7,00 m, de mediana a altamente meteorizado, muy fracturado y fragmentado	MALA	40 - 21	
B4	Esquisto Cuarzo - Clorítico (40,00 m - 53,20 m) E = 13,20 m , de ligero a mediana meteorizado, de extremadamente fracturado a	MALA	40 - 21	
B5	Esquisto Cuarzo - Clorítico (53,20 m - 61,20 m) E = 8,00 m , de mediana a altamente meteorizado, extremadamente fracturado y	MALA	40 - 21	
B6	Cuarcitas y Cuarcitas esquistosas (61,20 m - 74, 80 m) E = 13,60 m, ligeramente meteorizado, roca fracturada	MEDIA	60 - 41	CAPA II
B7	Cuarcitas esquistosas (74,80 m - 82,00 m) E = 7,20 m, de ligera a medianamente meteorizadas, fracturadas	MEDIA	60 - 41	
B8	Esquisto Cuarzo Clorítico (82,00 m - 85,20 m) E = 3,20 m, medianamente meteorizado y muy fracturado	MEDIA	60 - 41	
B9	Cuarcitas masivas y esquistosas (85,20 m - 91,20 m) E = 6,00 m, de mediana a ligeramante meteorizadas, muy fracturadas	MEDIA	60 - 41	
B10	Cuarcitas Masivas y esquistosas (91,20 m - 100,00 m) E = 8,80 m, la roca es sana y con esporádicas fracturas naturales.	BUENA	80 - 61	

Tabla 13.- Variedad de estratos pertenecientes a la roca metamórfica presentes en la zona de estudio y capa asignada a los mismos. Datos proporcionados por HIDROPAUTE [18]. Tabla realizada para el presente trabajo en función de la información recopilada.

El gráfico 31 se observa el estrato por el cual se da el plano de falla del talud, un estrato débil que presenta alteraciones.

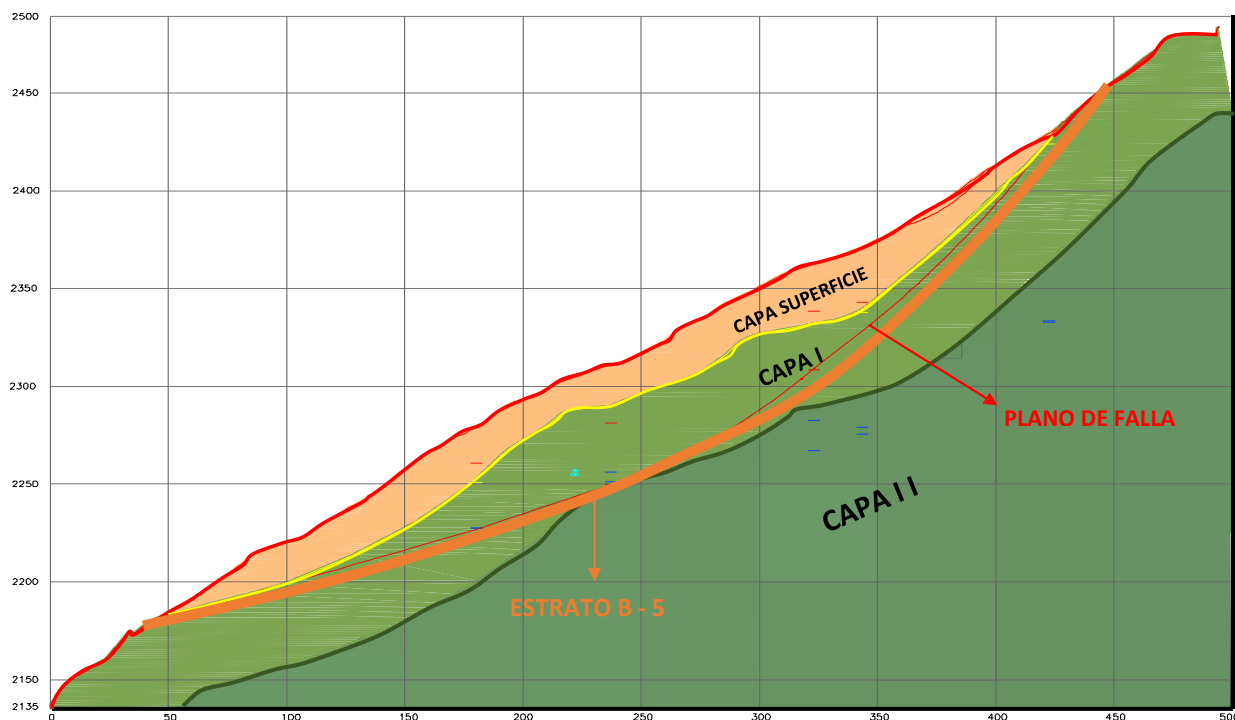


Gráfico 31.- Capas asignadas al Perfil B – B, la franja anaranjada representa el estrato B5 presente en la zona de estudio por el cual pasaría la superficie de falla principal, generado en base a los datos de perforaciones proporcionados por HIDROPAUTE.

En la tabla 14, aplicando la clasificación de Bieniawski para la zona en estudio, se identificó y correlaciono con la clasificación dos estratos rocosos correspondientes a la capa I y la capa II con su valoración, clase y calidad.

Clase	Calidad	Valoracion RMR	Zona de deslizamiento
I	Muy Buena	100 - 81	
II	Buena	80 - 61	
III	Media	60 - 41	CAPA II
IV	Mala	40 - 21	CAPA I
V	Muy Mala	< 20	

Tabla 14.- Valores de RMR para la Capa I y Capa II en el deslizamiento.

5.7.4 Resistencia a la compresión simple

No se pudo obtener los datos de resistencia a la compresión simple de la zona La Ermita Sur, pero de la información recopilada, se obtuvieron los datos correspondientes a la zona de embalse, que por su similitud geológica y litológica se va a adoptar en el presente trabajo, esto se observa en la tabla 15. Las dos últimas columnas de la tabla se adaptan al presente trabajo.

Competencia Resultante de la Roca y Foliación	Litología	Resistencia a la Compresión Uniaxial (MPa)				Identificación de capa en zona de deslizamiento	Valor asumido a capa
		Ensayo Paralelo a la Foliación	Ensayo Perpendicular a la Foliación	Promedio	Rango		
Masiva, de alta resistencia	Cuarcitas	86,6	244	117	100 - 250		
	Esquistos cuarcíticos Esquistos cuarcíticos, cloríticos-biotíticos Metavolcanitas	93,9	133,5 120,8 226,6	110,8			
Mediana resistencia, altamente foliada	Esquistos cloríticos, cuarcíticos, biotíticos.	44,1	64,1	56,1	50 - 100	CAPA II	50
Baja resistencia, altamente foliada	Esquistos cloríticos, fuertemente foliados, esquistos grafíticos, pizarras.	36,2	52,9	46,2	< 50	CAPA I	10

Tabla 15.- Relación de litología en función de su resistencia a la compresión uniaxial. Tabla proporcionada por HIDROPAUTE, adaptada de INECCEL [3], SWECO-INTERNACIONAL AB - BOTCONSULT Cía. Ltda. (1998).

5.7.5 Criterios de resistencia o rotura

El comportamiento mecánico del macizo rocoso, depende principalmente de su resistencia y de las fuerzas aplicadas, al no poder obtener leyes que regulen este comportamiento, se emplean criterios de rotura o resistencia, siendo estas, expresiones matemáticas que idealizan modelos simples para estimar estos parámetros.

Estos modelos matemáticos estiman la resistencia en función del comportamiento del mismo por medio de modelización numérica, dependiendo también de factores como nivel de agua, propiedades físicas, mecánicas, tensiones. Estos son utilizados en el análisis inverso, obteniendo parámetros reales de resistencia del macizo en la modelación [4].

5.7.5.1 Criterios de rotura Mohr – Coulomb

Este criterio es uno de los más estudiado en mecánica de rocas, considera la resistencia pico del material, una vez que se ha llegado a esta se produce una fractura por corte [4].

Este criterio es de rotura lineal y fue propuesto por Coulomb en el año 1773, no considera un comportamiento tenso – deformacionales del macizo, pero en cambio utiliza parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna del macizo, los mismos que Bieniawski propone en función del índice RMR [4].

Este criterio está en función de la siguiente expresión [4]:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi$$

de donde:

τ : Tensión tangencial

σ_n : Tensión normal sobre plano de rotura

c : Cohesión

ϕ : Ángulo de rozamiento

5.7.6 Parámetros físicos - mecánicos de la zona en estudio

Los parámetros asumidos para el deslizamiento La Ermita Sur, son los recopilados del informe de INECCEL [3], y fueron obtenidos de los diferentes ensayos realizados a la roca así como al material coluvial presente en el deslizamiento y las perforaciones realizadas en la zona [18], los mismos fueron proporcionados por HIDROPAUTE.

En la tabla 16 se observa los parámetros que se utilizarán en la modelación del deslizamiento para calcular el factor de seguridad y en función de los resultados aplicar el retro – análisis.



La tabla fue creada para el presente trabajo, los datos subsiguientes de esta tabla correspondientes al back analysis pueden ser utilizados para el diseño de las medidas correctivas en la ladera con el objetivo de optimizar las medidas en función del estado de equilibrio que representa este análisis.

Capa	Descripción de la capa	Cohesión (KN/ m ²)	Peso específico (KN / m ³)	Ø Grados
SUPERFICIE	Suelos coluviales con presencia de coluviales gruesos y fracciones de roca de muy baja calidad	35	17	32
CAPA I	Coluvial grueso y roca de muy baja calidad	150	24	25
CAPA II	Roca de mediana a baja calidad	300	28	40

Tabla 16.- Parámetros físicos – mecánicos obtenidos y proporcionados por HIDROPAUTE para el análisis de la zona en estudio [6]. Tabla creada y adaptada para el presente trabajo.



CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD Y MODELIZACIÓN DEL TALUD

6.1 Introducción

En este capítulo se analiza la estabilidad del talud Ermita Sur a través del método de Equilibrio Límite y el método Tenso – Deformacional.

Según lo expuesto en los capítulos anteriores, el análisis de la estabilidad permite determinar el factor de seguridad de la ladera en movimiento, en base a este factor tomar medidas correctivas que sean adecuadas para la zona es vital para evitar nuevos movimientos en el área de estudio. En el presente caso, en el que ya se produjo la rotura y se conoce el modelo geométrico del movimiento, se puede inferir en un retro análisis (back – analysis) con el fin de determinar los parámetros geomecánicos (c y ϕ) con los cuales el factor de seguridad se encuentra al límite, es decir la unidad, ya que los obtenidos por medio de los diferentes ensayos realizados en la ladera, son los que actualmente se encuentran en la zona y han permitido un movimiento leve.

En este análisis también se variará el nivel freático para modelar y calcular factores de seguridad en base a este parámetro, comprobando la hipótesis principal planteada de que el agua que se infiltra influye fuertemente en el deslizamiento en estudio, buscando una relación entre el factor de seguridad y la variación de profundidad del nivel freático.

6.2 Método de Equilibrio Límite

Los movimientos de taludes han sido analizados durante muchos años utilizando las técnicas del equilibrio límite, el cual requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no es necesario datos sobre la relación esfuerzo y deformación que sufre un determinado material [9].

El método de equilibrio límite asume que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y las resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor $FS = 1.00$, es decir en equilibrio. El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en dovelas (tajadas) [9]. Con este método se asume que el factor de seguridad es igual para todos los puntos a lo largo de la superficie de falla.

Diversos autores han propuestos varios métodos de equilibrio límite, la diferencia entre uno y otro radica en equilibrio que se tenga en el talud, ya sea equilibrio de fuerzas, equilibrio de momento o la combinación de los dos, así como en el tipo

de superficie de falla presente. En la tabla 17 se observa los métodos más utilizados y sus características.

Método	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	De momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobredeterminada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma de superficie de falla.	De fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobredeterminada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección F_0 para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Asume que las fuerzas entre partículas están inclinados a un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas. Esta simplificación deja una serie de incógnitas y no satisface el equilibrio de momentos. Se considera el más preciso de los métodos de equilibrio de fuerzas.
Spencer (1967)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que las magnitudes de las fuerzas verticales siguen un sistema predeterminado. Utiliza el método de las dovelas para calcular la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla. Esto permite desarrollar una relación entre el coeficiente sísmico y el factor de seguridad. El factor de seguridad estático corresponde al caso de cero coeficiente sísmico. Satisface todas las condiciones de equilibrio; sin embargo, la superficie de falla correspondiente es muy diferente a la determinada utilizando otros procedimientos más convencionales.

Tabla 17.- Métodos de equilibrio límite en función de la superficie de falla y del equilibrio de fuerzas y momentos. Tabla tomada del libro de Jaime Suárez, Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales, pg. 122 [9].

6.2.1 Método de Morgenstern-Price

Este es un método general de cortes realizados en la base del equilibrio límite. Su objetivo es el equilibrio de fuerzas y momentos actuando en bloques individuales. Los bloques son creados dividiendo el suelo sobre la superficie en planos [9]. Este método es aplicable a cualquier tipo de falla, planar o circular, adicional su resolución es netamente computacional.

En el gráfico 32 se muestran las fuerzas que actúan en los bloques (estabilizadoras y desestabilizadoras) para la resolución por este método.

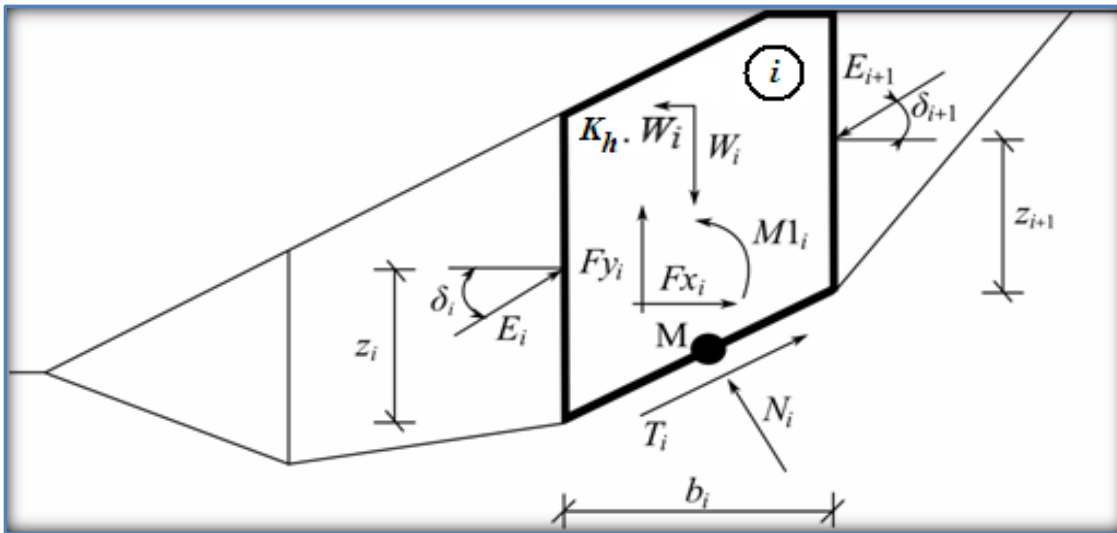


Gráfico 32.- Esquema estático del método Morgenstern-Price

Siendo:

- W = Peso del bloque
- M = Punto centro del segmento
- N = Fuerza Normal actuante en cada bloque
- E = Fuerzas actuantes entre bloques
- T = Fuerza tangencial actuante en cada bloque
- δ = Angulo de inclinación de las fuerzas externas

Se deben realizar las siguientes consideraciones al utilizar el método Morgenstern - Price para calcular el equilibrio límite de las fuerzas y de momentos de los bloques individuales:



- ❖ Los planos divididos entre bloques son siempre verticales.
- ❖ La línea de acción de peso del bloque W_i pasa por el centro del segmento i^{th} de la superficie de deslizamiento representada por el punto **M**.
- ❖ La fuerza normal N_i actúa en el centro del segmento i^{th} de la superficie de deslizamiento, en el punto **M**.
- ❖ La inclinación de las fuerzas E_i que actúan entre los bloques es diferente en cada bloque (δ_i) al punto extremo de la superficie de deslizamiento $\delta = 0$.

Este método se asimila al de Spencer, la única diferencia es que el método de Morgenstern - Price permite especificar diferentes tipos de fuerzas actuantes como se observa en el gráfico 32 [11].

6.3 Software Slide 5.0

Slide (Rocscience), es un software utilizado para el análisis de estabilidad de taludes, pudiendo evaluar en taludes de suelo y roca fallas circulares y no circulares. La geometría del talud es graficable por medio de coordenadas o se puede importar archivos CAD digitalizando la misma.

Este programa tiene la versatilidad de analizar la estabilidad utilizando métodos de equilibrio límite con rodajas verticales, revisando superficies individuales o buscando y examinando la superficie crítica para un talud dado.

Este software tiene las siguientes características [19]:

- ❖ Aplica métodos de búsqueda de la superficie crítica para superficies de deslizamiento circular o no circular.
- ❖ Aplica métodos de equilibrio como: Spencer, GLE/Morgenstern-Price, Janbu, Bishop.
- ❖ El análisis lo realiza con múltiples materiales, anisotrópicos, materiales no lineales, Mohr – Coulomb y otros.
- ❖ Considera el agua subterránea, el factor de presión R_u , red de presiones de poros y la infiltración que se tenga en una zona.
- ❖ Se puede modelar con cargas externas lineales, sísmicas o distribuidas.
- ❖ Analiza las fuerzas de apoyo requeridas para casos específicos.
- ❖ Vistas de todas y cada una de las superficies generadas.
- ❖ Considera el ingreso de planos de falla conocidos.

Con este software se realizó la modelación del talud, a su vez se utilizó el método de Morgenstern-Price como el de equilibrio límite.

El análisis respectivo se realizó de la siguiente forma:

- ❖ Análisis de la situación del talud en condiciones originales en función de la información recopilada, analizando con plano de falla individual identificado y plano de falla crítico determinado por el programa.
- ❖ Análisis de la situación del talud en condiciones originales con variante pseudo-estática utilizando coeficiente sísmico recopilado para la zona.
- ❖ Análisis de la variación del factor de seguridad en base a diferentes profundidades de nivel freático.
- ❖ Análisis inverso por sensibilidad, buscando un factor de seguridad igual a la unidad en función de la variación de (c y ϕ) para la condición de nivel freático máximo – medio – mínimo.

6.4 Modelación del talud

A continuación se resume la modelación del talud utilizando el programa Slide 5.0, en diferentes condiciones en base a la información recopilada en los capítulos anteriores.

6.4.1 Condiciones originales del talud

En función de la información recopilada y señalada anteriormente se pudo graficar el nivel freático en condiciones originales según los datos de los piezómetros colocados en la zona de estudio, a más de esta información, utilizando la tabla 20 en la cual se obtuvo los parámetros físicos mecánicos de la zona se procedió a ingresar los datos de la geometría del talud y sus características físicas – mecánicas, se eligió el método de equilibrio en función del tipo de movimiento en el cual se dedujo que es del tipo traslacional, adicional a esto utilizando el criterio de rotura Mohr – Coulomb, se ingresó el plano de falla identificado en las perforaciones realizadas con estos datos se modelo al talud.

Se modelo de dos formas: con el plano de falla original fluctuando la profundidad del nivel freático y buscando planos de fallas críticos en función del nivel freático, en el anexo 16 se observa los gráficos del FS encontrado en función del plano de falla asumido.

A continuación se observa la modelación buscando plano de falla en condiciones críticas según la profundidad del nivel de agua.

En el gráfico 33 se observa el perfil generado en función del nivel freático identificado en la zona, de igual manera se graficó el plano de falla determinado y las capas de material actuantes en el deslizamiento.

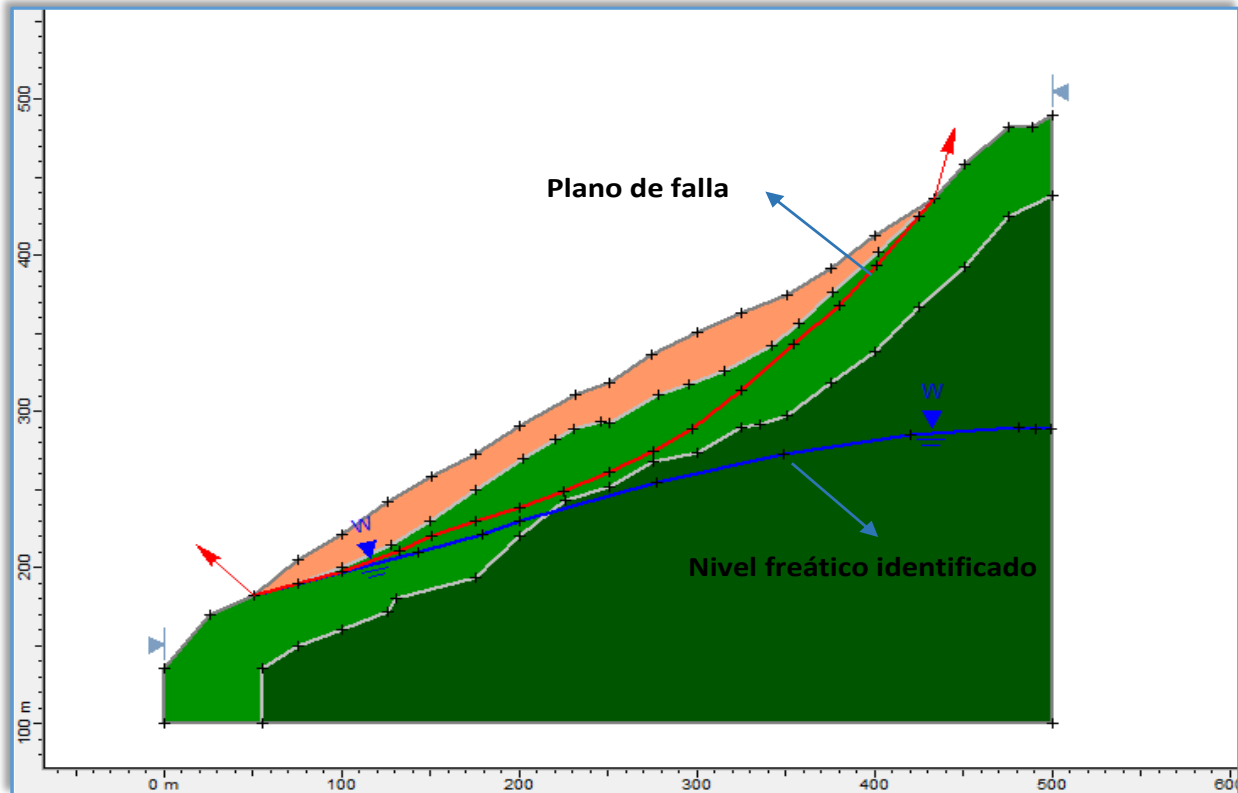


Gráfico 33.- Perfil utilizado para el análisis del talud, se observa los estratos presentes, el nivel freático y el plano de falla identificado en las perforaciones.

En el gráfico 34 se observa el factor de seguridad considerando la situación real a la cual está sometido el talud, el mismo da un valor de $F_s = 1.187$, es decir la situación del talud es estable al límite con el nivel freático a partir de 62 m de profundidad considerando la superficie y las coordenadas de la perforación PE – 8 como cota de origen. Se observa también el plano de falla identificado en las perforaciones y el calculado por el programa, el FS es en base a este último.

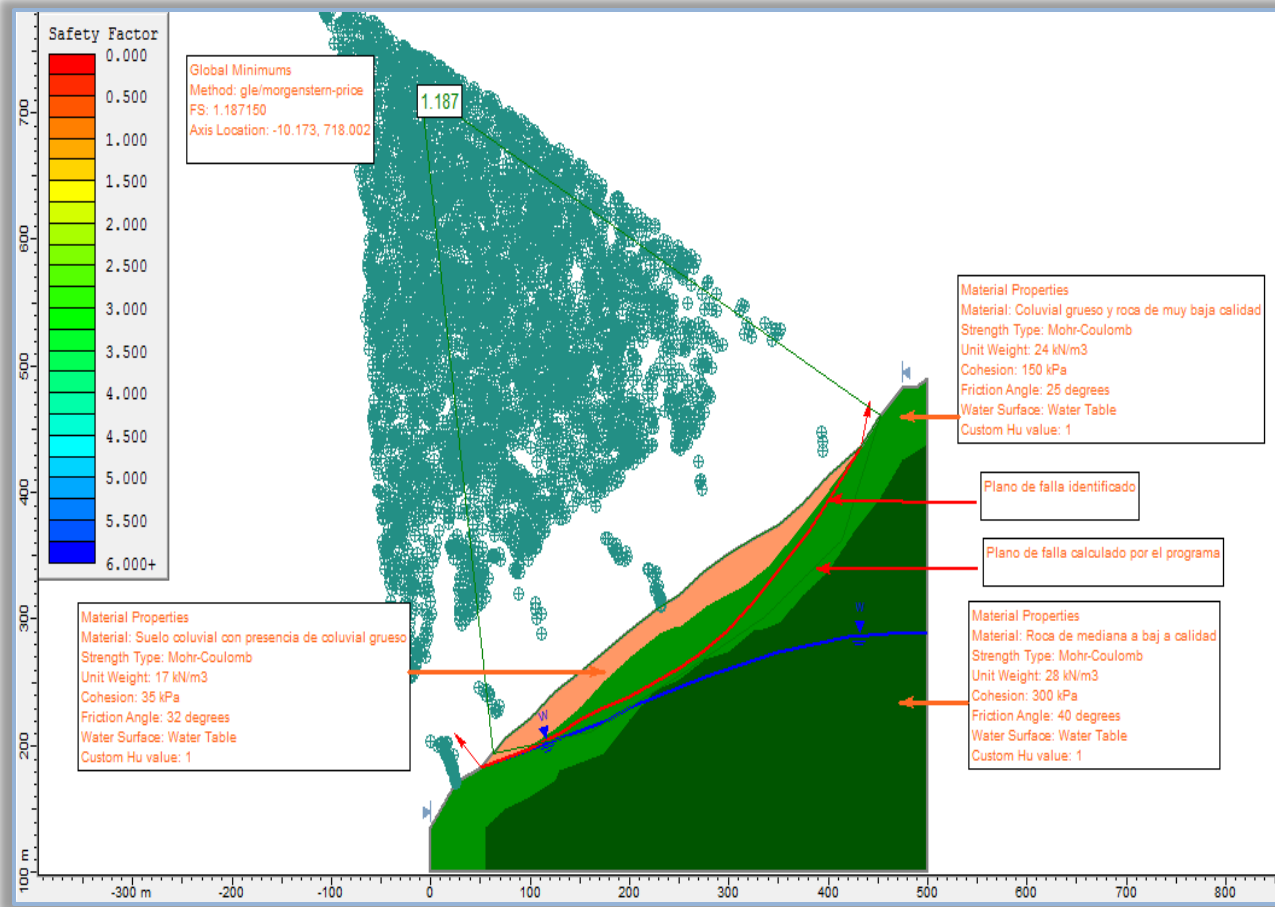


Gráfico 34.- Factor de seguridad calculado en base al método de equilibrio límite de Morgenstern-Price para la situación real del talud en la cual se tiene un nivel freático aproximadamente a 62 m de profundidad desde la superficie. En este gráfico se observa adicional las características de los materiales que conforman el talud, su método de cálculo, sus condiciones originales y los planos de falla tanto el asumido como el calculado por el programa.

En el gráfico 35 se observa la variación del factor de seguridad a lo largo del perfil, identificando los valores más altos entre los 200 y 300 m de longitud en las coordenadas en la abscisa de las X, mientras los más bajos entre los 50 y 100 m y sobre los 400 m de longitud. Esto indica las zonas con mayor inestabilidad en el perfil y propensas a deslizamientos por estar cerca del límite de equilibrio.

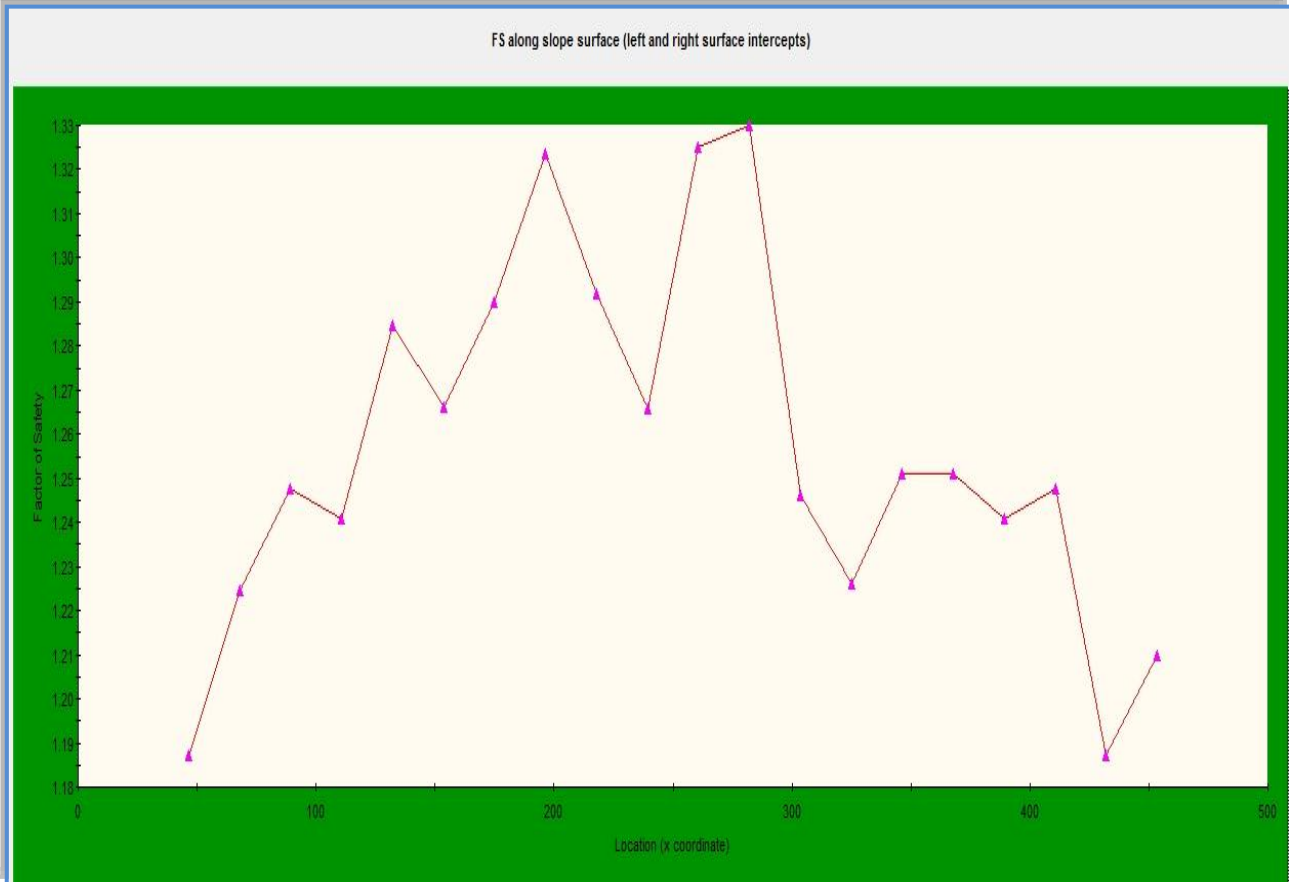


Gráfico 35.- Variación del factor de seguridad en condiciones originales a lo largo del talud, se identifican zonas propensas a deslizamientos alrededor de las abscisas 50 y 450.

6.4.2 Condiciones originales del talud con coeficientes sísmicos

Utilizando los datos obtenidos y utilizados en el literal anterior se verificó el comportamiento del talud en condiciones pseudo-estáticas con sismos de 0.24 g de aceleración conforme lo señalado anteriormente, este valor corresponde a un sismo similar a una magnitud de 7 grados, de igual manera se verificó al movimiento para un sismo de menor magnitud con una aceleración de 0.12 g, que son más frecuentes en la zona según la información sísmica proporcionada por HIDROPAUTE [6].



En el gráfico 36 se observa el factor de seguridad con un sismo de 0.12 g, el valor calculado es de $FS = 0.954$, un sismo de esta magnitud ya representa un factor de inestabilidad y produciría el fallo del talud. Las zonas de mayor riesgo se localizan a lo largo del plano de falla asumido que prácticamente coincide con el calculado por el programa a lo largo de la capa superficial, están identificadas por el color anaranjado, mientras la zona más estable se identifica por su coloración de amarilla que ligeramente supera la unidad.

En el gráfico 37 se observa el factor de seguridad con un sismo de 0.24 g, el valor calculado es $FS = 0.786$, lo cual indica que se daría un deslizamiento de material producto de un sismo de estas características ya que el talud ya no se encontraría en equilibrio de ocurrir este suceso. Las zonas de mayor riesgo se identifican por el color anaranjado, con un sismo de estas características se produciría un deslizamiento prácticamente de toda la capa superficial.

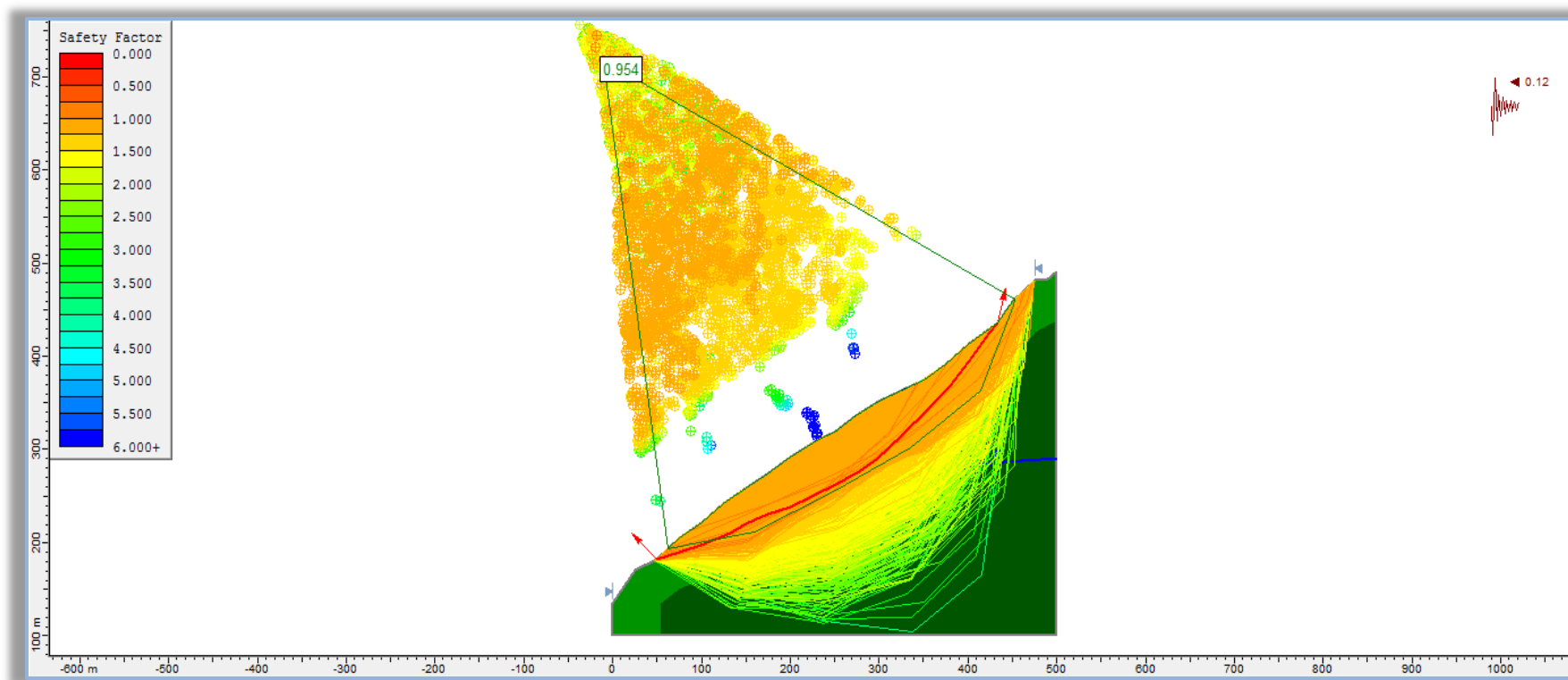


Gráfico 36.- Factor de seguridad para un sismo con una aceleración de 0,12 g.

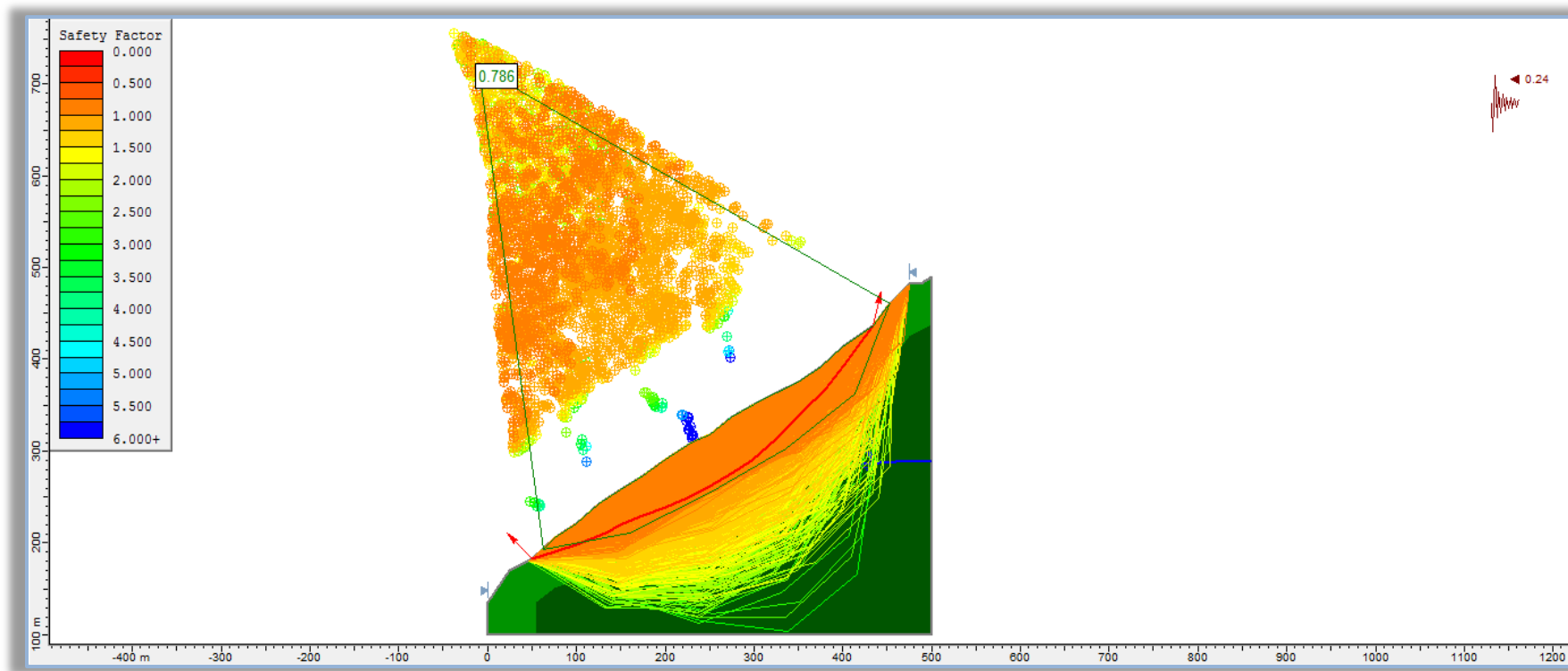


Gráfico 37.- Factor de seguridad para un sismo con una aceleración de 0,24 g.

6.4.3 Factor de seguridad en función de diferentes niveles freáticos

Se realizó una variación de las profundidades de nivel freático, desde los 62 m hasta llegar a la condición más crítica en la cual el nivel de agua se encuentre sobre la superficie del terreno, en base a esta variación se realizó una curva de relación entre la disminución del factor de seguridad en función de la profundidad a la que se puede localizar el nivel en diferentes condiciones.

Los gráficos con sus respectivos factores de seguridad y profundidad de los niveles freáticos se observan en el anexo 15.

En el gráfico 38 se observa la disminución del factor de seguridad conforme el nivel freático aumenta hasta llegar a su punto más crítico sobre la superficie del suelo, conforme aumenta la profundidad del nivel freático aumenta el factor de seguridad. En base a este criterio se realizó el análisis inverso que se estudia en el literal siguiente.

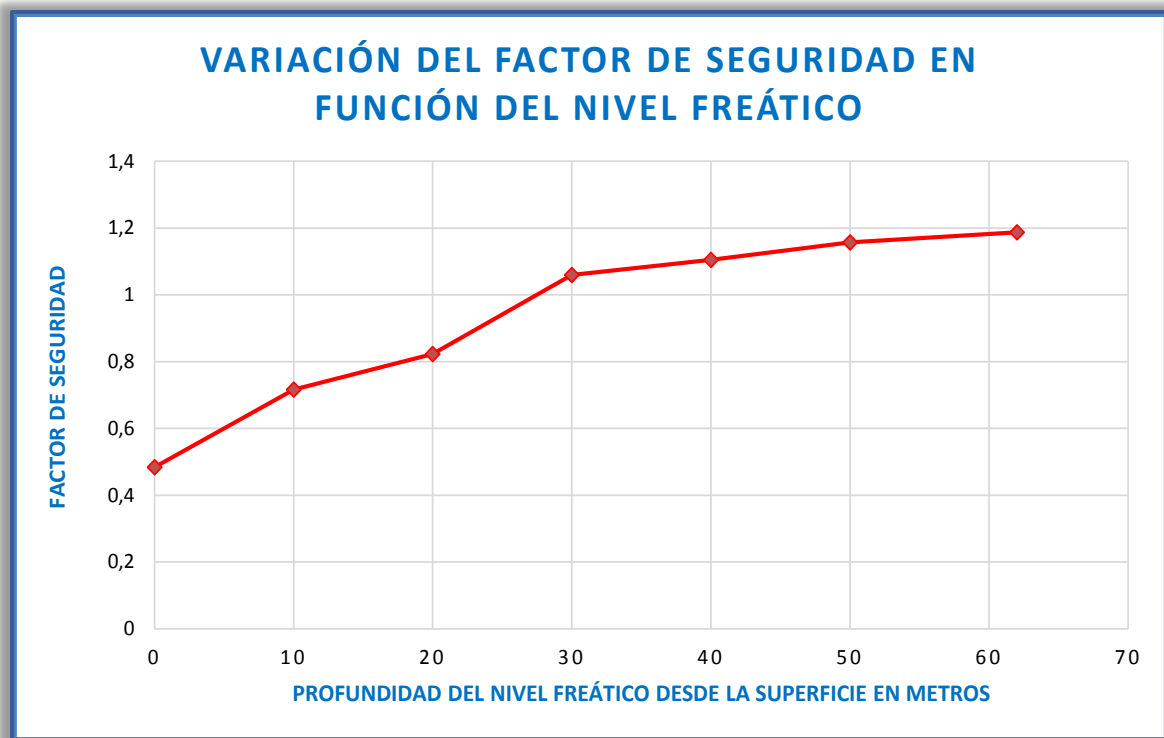


Gráfico 38.- Disminución del factor de seguridad conforme el nivel freático asciende hasta su punto más crítico en la superficie del talud.

6.4.4 Análisis inverso de las propiedades de los materiales

El análisis inverso es utilizable para determinar la resistencia del material en la falla del talud, o la resistencia del material requerido para alcanzar un factor de seguridad determinado [19].

6.4.4.1 Análisis probabilístico

Con el programa Slide, es posible utilizar la opción análisis probabilístico para llevar a cabo el análisis inverso de diferentes variables simultáneas. Por ejemplo, determinar todos los valores posibles de cohesión y ángulo de fricción para un factor de seguridad específico, pero es requerido conocer datos de laboratorio de las características físico – mecánicas variables de los materiales que interfieren en la ladera, en la presente tesis no se va a realizar el análisis probabilístico ya que no se dispone de la variabilidad de la cohesión y del ángulo de fricción de la capa superficial del talud, por lo cual se va a realizar este procedimiento solo por el análisis a sensibilidad.

6.4.4.2 Análisis de sensibilidad

El análisis inverso por sensibilidad brinda la opción de buscar un factor de seguridad determinado en función de las variables individuales variando las mismas hasta llegar al objetivo.

En el presente estudio se utiliza el análisis inverso por sensibilidad con el objetivo de identificar las variable individuales físico – mecánicas con las cuales tenemos un factor de seguridad $FS = 1$, es decir al límite de su equilibrio. Estas variables (c y ϕ) son las correspondientes a la capa superficial es decir suelo coluvial con presencia de materiales gruesos.

Para este análisis se utilizó los valores físicos – mecánicos recopilados anteriormente, adicional, es necesario conocer el plano de falla por donde está ocurriendo o puede ocurrir el desplazamiento de material, al realizar la modelación el programa identifica la zona en la cual se presenta el menor FS y grafica el plano de falla más crítico.

Adicionalmente se definió el nivel freático más crítico que afecta al factor de seguridad, en el presente caso se determinó el nivel freático superior como una capa de agua que se encuentra sobre la superficie del suelo coluvial, el nivel freático inferior como el nivel de agua que se encuentra a 60 m de la superficie, con estos datos el programa calcula automáticamente un nivel freático medio correspondiente a una capa freática aleatoria de las probabilidades más fuertes de la ubicación del nivel que podrían ocurrir, este nivel se ubicó aproximadamente a 28 m de la superficie del talud.

En el gráfico 39 observamos el factor de seguridad es de $FS = 0,970$ resultado del análisis inverso a sensibilidad, identificando la zona de mayor riesgo de deslizamiento entre las abscisas 50 y 250. Para este valor se utilizó el c y ϕ originales del talud y se colocó una variación de más 10 y menos 10 respectivamente a partir del valor original como centro de variación.

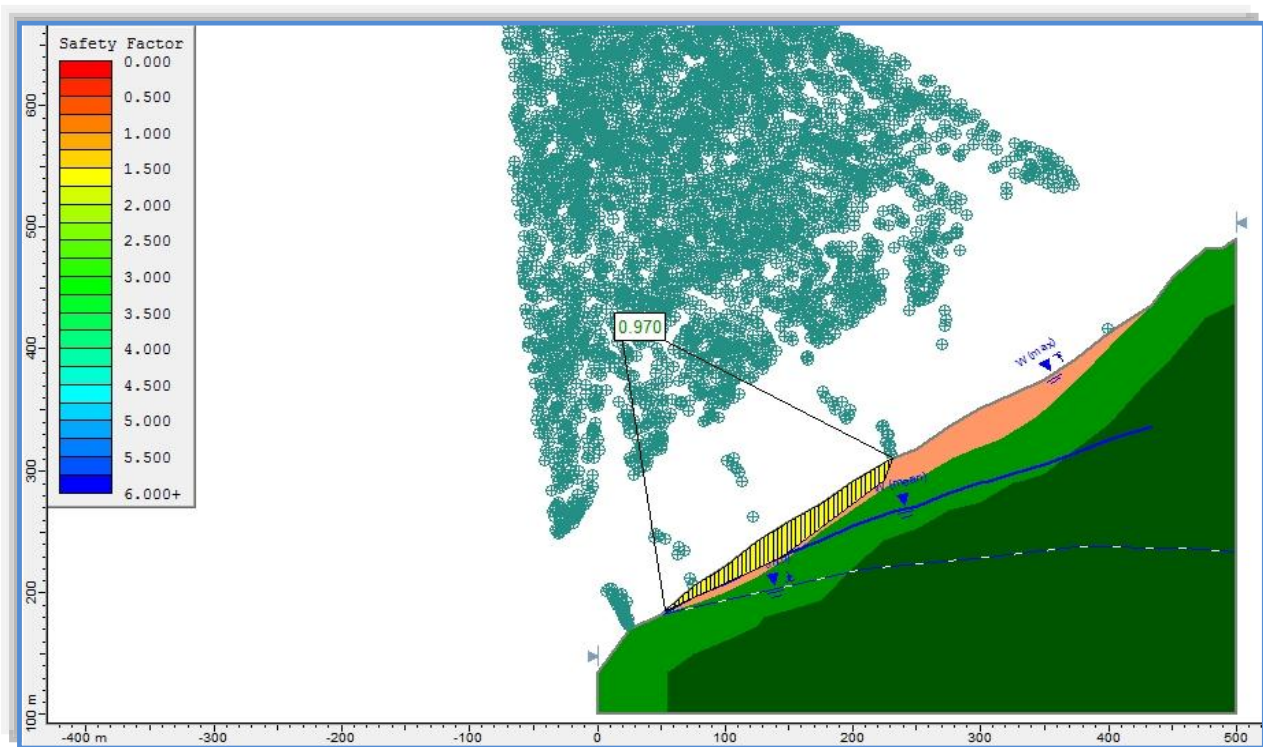


Gráfico 39.- Análisis inverso por sensibilidad buscando los parámetros físicos – mecánicos para un factor de seguridad igual a la unidad, contemplando el nivel freático y la superficie de falla más críticos localizados en la modelación.

El procedimiento adoptado para este análisis fue el siguiente:

- Se selecciona parámetros del proyecto, se marca la opción de estadísticas, se activa la casilla análisis de sensibilidad (“sensitivity analysis”).
- Luego se selecciona la opción materiales (“materials”) desde el menú estadísticas (“statistics”).
- En el presente caso, las dos variables para un análisis de sensibilidad elegidas son la cohesión y el ángulo de la capa superficial que es la capa más débil del talud.



- Los parámetros de resistencia del material son conocidos, por lo cual inicialmente se varió la cohesión, y el ángulo de fricción se mantuvo invariable, para determinar el valor del parámetro en búsqueda. Colocando el valor original de la cohesión como medio, se aumenta y disminuye 10 kN/m² al valor original, este valor se impone con el objetivo de que las variables varíen hasta intersectar al FS buscado.
- Al utilizar el análisis de sensibilidad, y el hecho de que se tiene una superficie de falla conocida adicional a que el factor de seguridad en búsqueda es igual a la unidad, se puede determinar fácilmente un valor de cohesión de la capa débil en la falla para este valor.
- Debido a que todos los parámetros de los valores medios son utilizados para calcular el factor de seguridad determinístico durante un análisis de sensibilidad, cualquier cambio en los valores medios afecta el factor de seguridad determinístico.
- Una vez que se realizó este proceso, en la opción gráfico de sensibilidad ("sensitivity plot") desde el menú estadísticas ("statistics"), se activa solo la casilla de cohesión, la casilla del ángulo de fricción se deja en blanco, como se observa en el gráfico 40 el valor de la cohesión para un FS = 1, es de 33.49 KN/m².
- Realizando los pasos anteriores ahora para encontrar el ángulo de fricción para el factor de seguridad en equilibrio, este valor es de 25.89° como se observa en el gráfico 41.

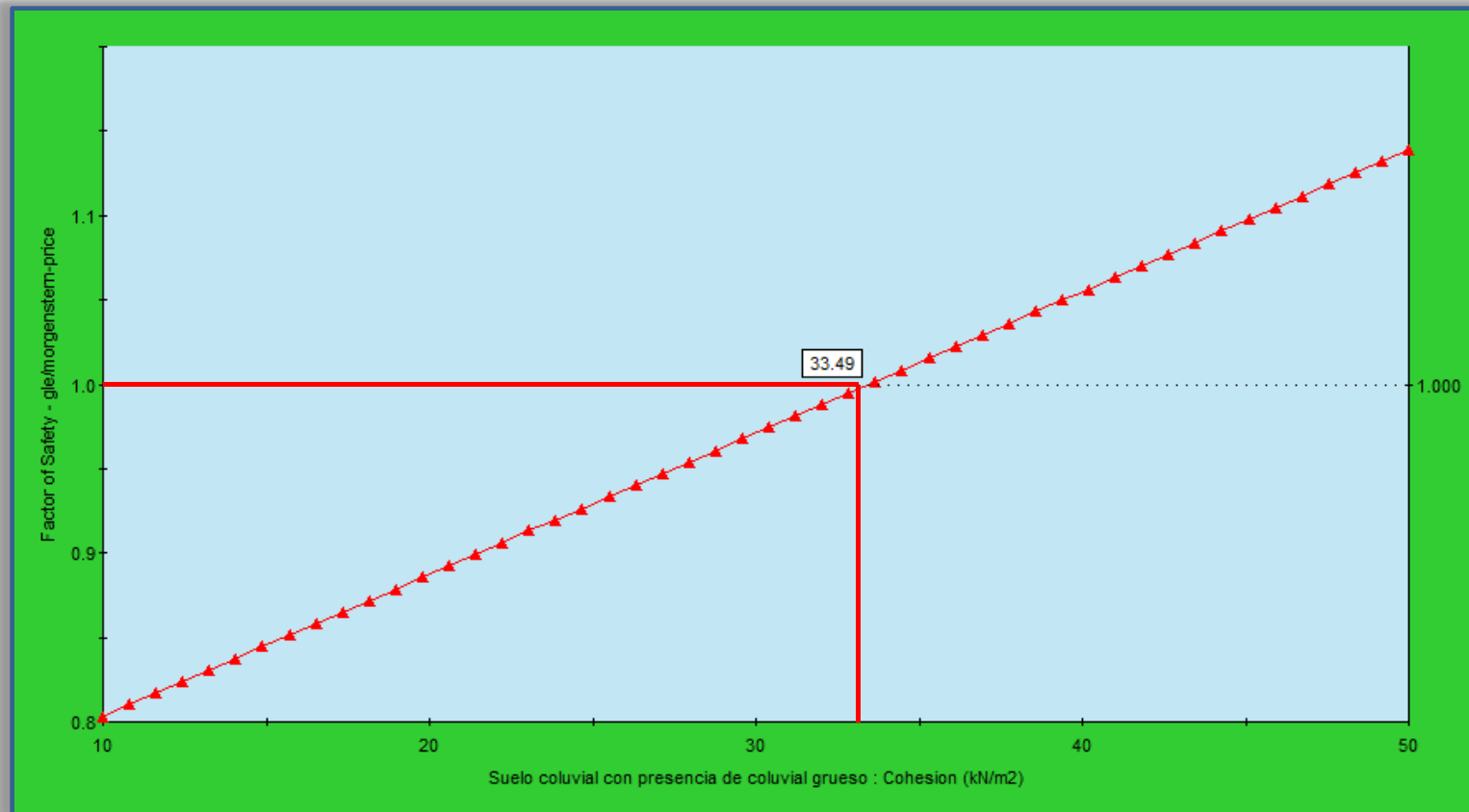


Gráfico 40.- Cálculo del valor de cohesión por análisis inverso para un factor de seguridad igual a la unidad, este valor está calculado para la zona más crítica localizada en la modelación con un FS = 0,970

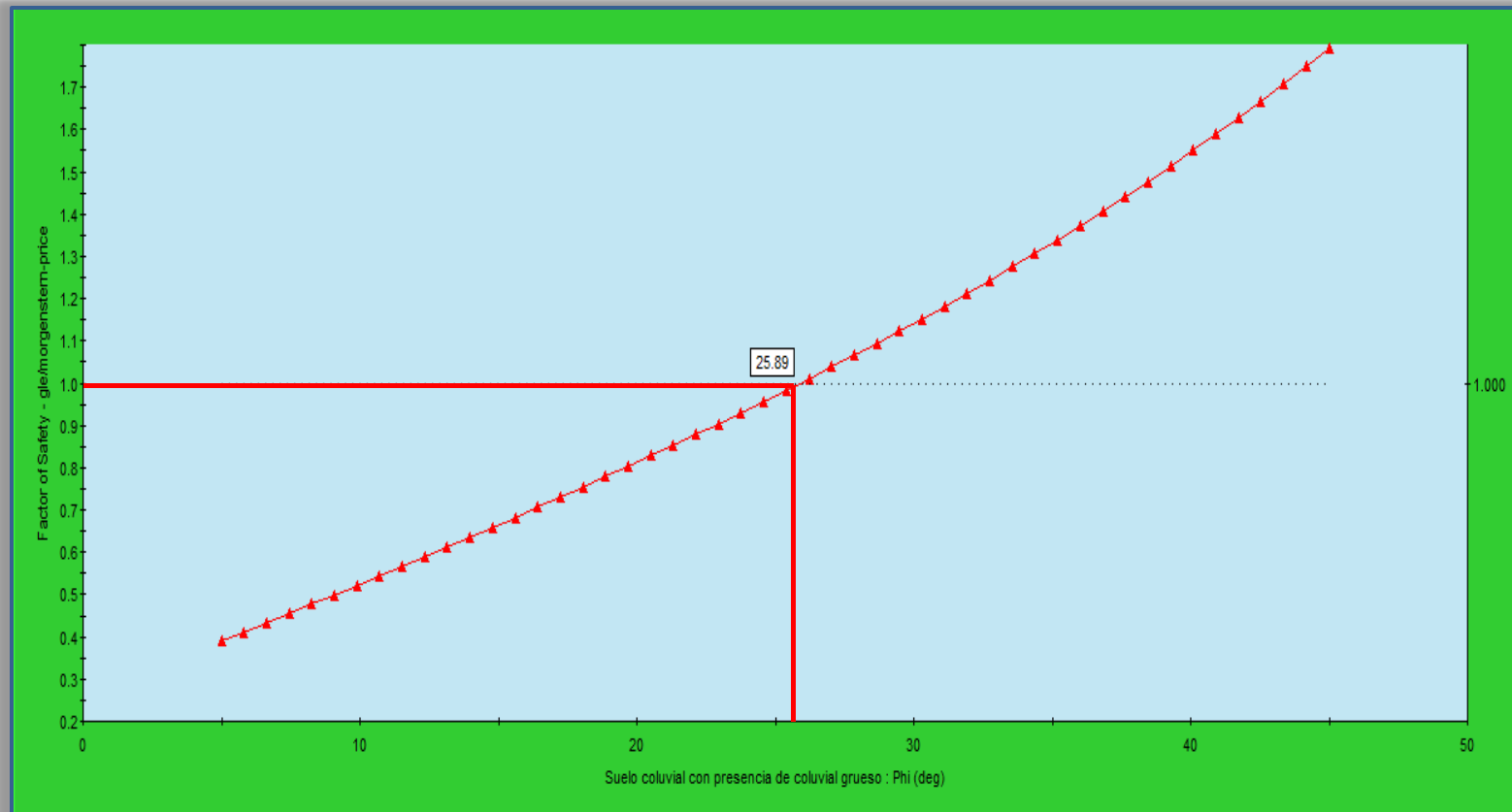


Gráfico 41.- Cálculo del valor del ángulo de fricción por análisis inverso para un factor de seguridad igual a la unidad, calculado en función de la zona de mayor debilitamiento identificado en la modelación.

6.5 Método tenso – deformacional

Este método se centra en la relación de tensión-deformación que se produce en un determinado material durante el proceso de deformación hasta llegar al punto de rotura.

En este proceso se generan varios estados tensionales en las distintas zonas del talud, permitiendo modelizar este cambio a partir de un modelo geométrico representativo, incluyendo las características litológicas, freáticas entre otras que se tengan en el talud, obteniéndose valores correspondientes a los desplazamientos, deformaciones y tensiones que se van generando a partir de la resolución de las ecuaciones de plasticidad mediante el método de los elementos finitos [4].

6.5.1 Método de elementos finitos

Los Métodos de Elementos Finitos (MEF) brindan soluciones numéricas a un medio continuo sobre el cual está definido ciertas ecuaciones diferenciales en forma integral que caracterizan el comportamiento físico del problema dividiéndolo en un número de subdominios entre sí [9].

En el MEF existen conceptos como discretización, que es una partición del dominio del conjunto de elementos finitos. Los nodos son puntos representativos que se encuentran dentro de cada elemento, a su vez el conjunto de nodos se denomina malla.

6.6 Software a utilizar

Para el análisis se emplea al software Phase 2, este programa analiza diferentes tipos de proyectos, incluyendo la estabilidad de taludes en roca o suelo, utilizando el MEF para un análisis en 2D en un medio elasto - plástico. Con este programa se va a generar la malla y posteriormente calcular los desplazamientos, deformaciones, tensiones que afectan al medio [20].

Con este software se realizó la modelación del talud con el siguiente procedimiento:

- ❖ La geometría y condiciones del perfil elegido se importa de Slide ya que este programa tiene a facilidad de extraer archivos entre sí.
- ❖ Se definen y asignan las propiedades físico –mecánicas de los materiales que conforman el talud.
- ❖ Se asignan las condiciones de contorno que tiene el talud, en la base restricciones en ambos ejes (X – Y). En las paredes laterales restricciones al movimiento horizontal.



- ❖ Posteriormente se continúa con el paso de discretización, se divide en partes más pequeñas al material para el análisis.
- ❖ Se procede con la formación de la malla, para este paso existen tres tipos de malla como opción que nos da el programa, gradual, uniforme o radial, para este caso la elección es uniforme.
- ❖ Se elige el tipo de triángulo para el mallado, en este caso triángulos de 6 nodos.
- ❖ Para el cálculo del factor de seguridad se activa la opción de reducción de resistencia al corte SSR, la cual es una reducción progresiva hasta producir la rotura del material.
- ❖ Al realizar este procedimiento se puede observar los desplazamientos, zonas de tensión, entre otros y analizarlos según la condición elegida.

6.7 Modelación del talud con Phase 2.

A continuación se resume la modelación de la ladera utilizando Phase 2, en diferentes condiciones en base a la información recopilada en los capítulos anteriores.

6.7.1 Condiciones originales del perfil

En función de la información recopilada se graficó el nivel freático en condiciones originales según los datos de los piezómetros colocados en la zona de estudio, a más de esta información utilizando la tabla número 18, en la cual se indica los parámetros de la zona que se obtuvo anteriormente, se procedió a ingresar los datos de la geometría del talud y sus características físicas – mecánicas de las diferentes capas que conforman la ladera en estudio.

Al ingresar las condiciones de contorno del talud; movimientos horizontales y verticales en la base restringidos, y movimiento horizontal restringido para paredes se obtuvo el gráfico 42, en el cual se observa la geometría del talud, el mallado elegido, las condiciones de contorno y los materiales que conforman el talud.

Capa	Descripción de la capa	Cohesión (KN/ m ²)	Peso específico (KN / m ³)	Ø Grados	v	E (Kpa)
SUPERFICIE	Suelos coluviales con presencia de coluviales gruesos y fracciones de roca de muy baja calidad	35	17	32	0,3400	57000
CAPA I	Coluvial grueso y roca de muy baja calidad	150	24	25	0,3200	132000
CAPA II	Roca de mediana a baja calidad	300	28	40	0,3000	1338000

Tabla 18.- Parámetros utilizados para la modelación con el software Phase 2 del deslizamiento La Ermita Sur.

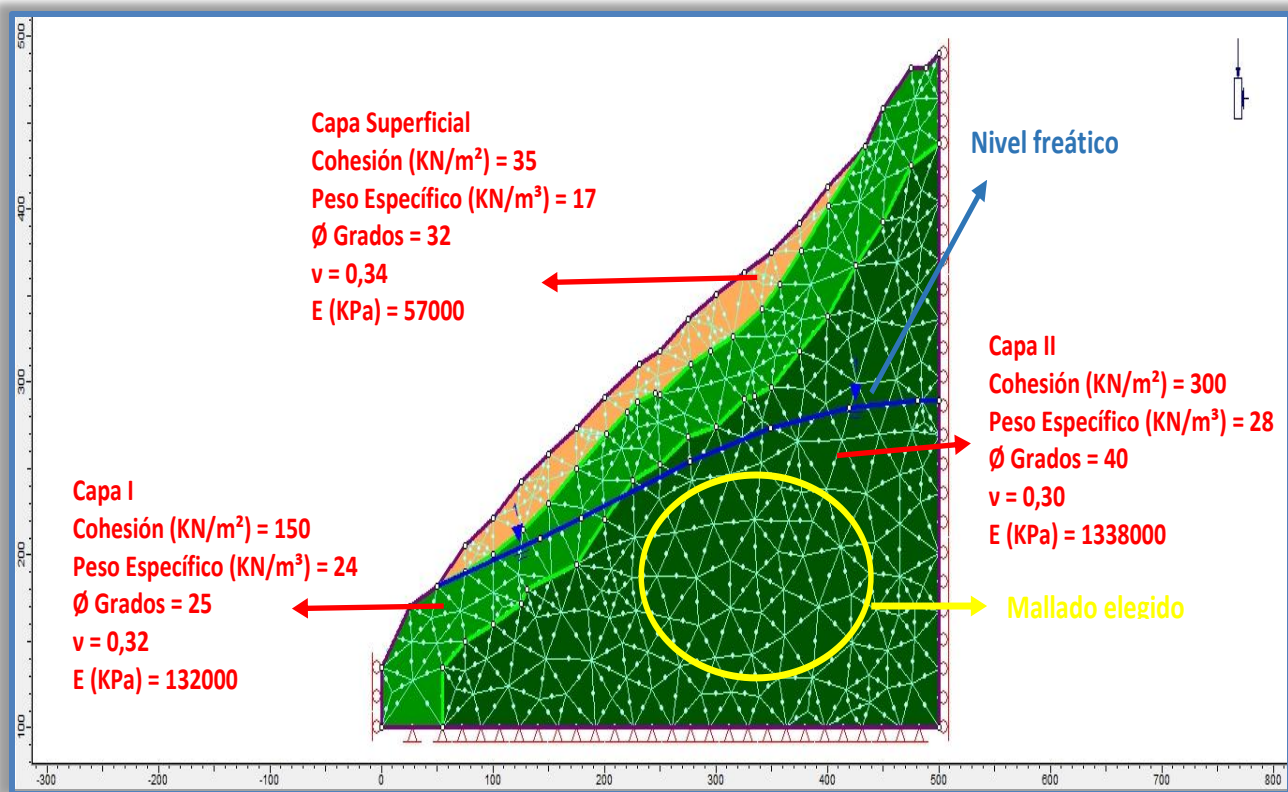


Gráfico 42.- Modelización del talud por el Método de Elementos Finitos, condiciones iniciales con nivel freático, mallado, restricciones horizontales, verticales y características de los materiales que lo conforman.

En el gráfico 43 se observa los esfuerzos principales en base a la carga gravitacional identificados en la base del talud con color verde, amarillo y naranja, en la superficie la coloración azul indica que la existencia de esfuerzos en esa parte es menor.

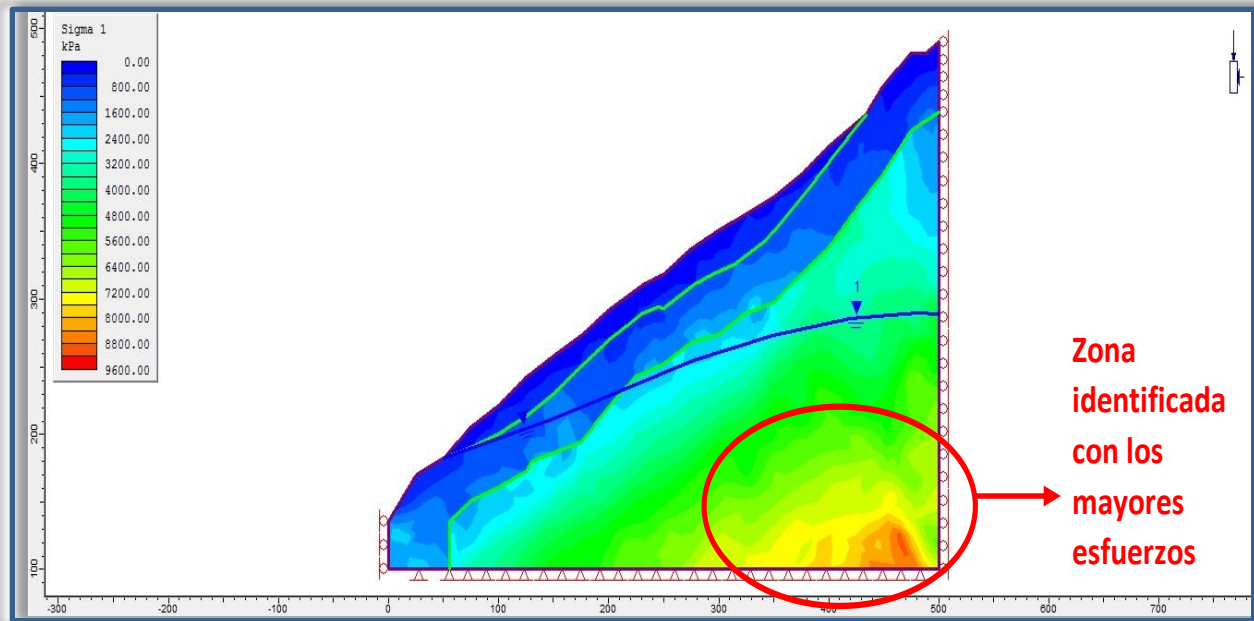


Gráfico 43.- Distribución de esfuerzos principales ocasionados al ejecutar la opción de carga gravitacional en las condiciones originales del talud.

6.7.2 Reducción de la resistencia a cortante (SSR) en el perfil

En este paso se va a obtener la resistencia al corte original del suelo y la resistencia al corte por la cual se produjo la rotura, esta resistencia está al límite, es decir va a buscar la rotura del material, para esto se activa la casilla SSR (Shear Strength Reducction).

El criterio de rotura es lineal al igual que en la modelación de Slide, es decir el criterio de análisis de Mohr Coulomb, los parámetros físicos – mecánicos son los mismos definidos anteriormente, adicional a estos hay que ingresar el Módulo de Elasticidad y coeficiente de Poisson ya definidos, consideramos un material plástico, asignando al tensor de fuerzas el mismo valor que asignamos a la cohesión de cada material, el ángulo de fricción y la cohesión residual son los mismos que los valores picos por que el material se mantiene constante desde la plastificación. Como no se tiene un incremento en el volumen del material la dilatación es cero. Aplicando estos datos a la modelación obtenemos el factor de seguridad crítico, de igual manera los desplazamientos relativos.



En el gráfico 44 se observa el factor de seguridad resultante al aplicar SSR, observando la imagen, cuando la deformación está en cero se muestra de color azul, mientras la deformación aumenta va cambiando su coloración hasta su máximo color en rojo, en este caso la máxima deformación esta localiza en la Capa I, identificada como una roca de mala calidad, al analizar por el MEL se identificó esta como la zona del plano de falla del talud.

En el gráfico 45 se observa el desplazamiento horizontal presente en el talud a causa de la reducción del cortante, los mayores desplazamientos se dan entre las abcisas de la 200 a la 400, identificándose el plano de falla presente en el talud.

En el gráfico 46 se observa la distribución de los esfuerzos de corte – tensión provocada por el máximo esfuerzo de corte en el talud, en esta imagen se muestran los puntos de plasticidad por compresión (x) y tensión (o), que indican las zonas en donde el material ha alcanzado el criterio de falla establecido.

En el gráfico 47 se observa el desplazamiento absoluto a causas de la reducción del esfuerzo de corte en las condiciones originales del talud, en la modelación existe un movimiento al igual que los registros de inclinómetros colocados en la zona de estudio.

El gráfico 48 muestra la masa deslizada, el contorno original y el final si es que se produciría un deslizamiento. La zona localizada entre las abcisas 200 y 400 sería la más afectada y provocaría caída del material al río y por ende afectando la presa.

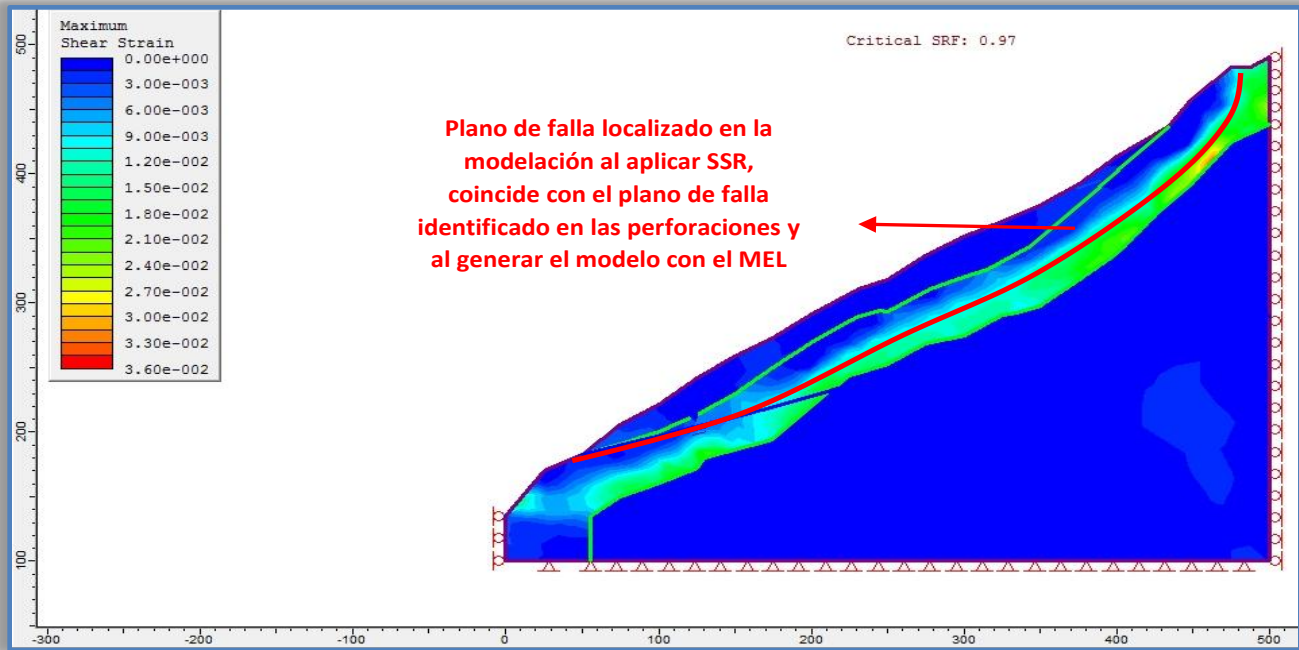


Gráfico 44.- Máximo esfuerzo por cortante que se produce en el talud, se identifica plano de falla y esfuerzo localizado en la capa I.

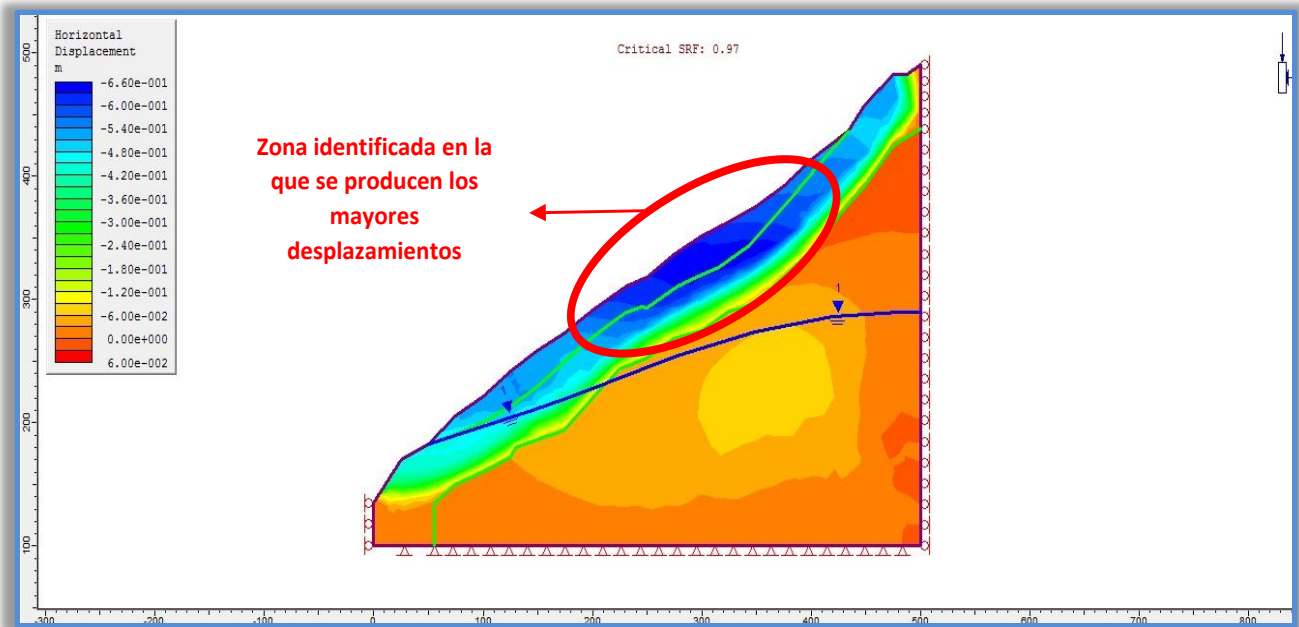


Gráfico 45.- Desplazamiento horizontal producto de la reducción del esfuerzo cortante en el talud, la zona en la que se dan los máximos desplazamientos se identifican con color azul

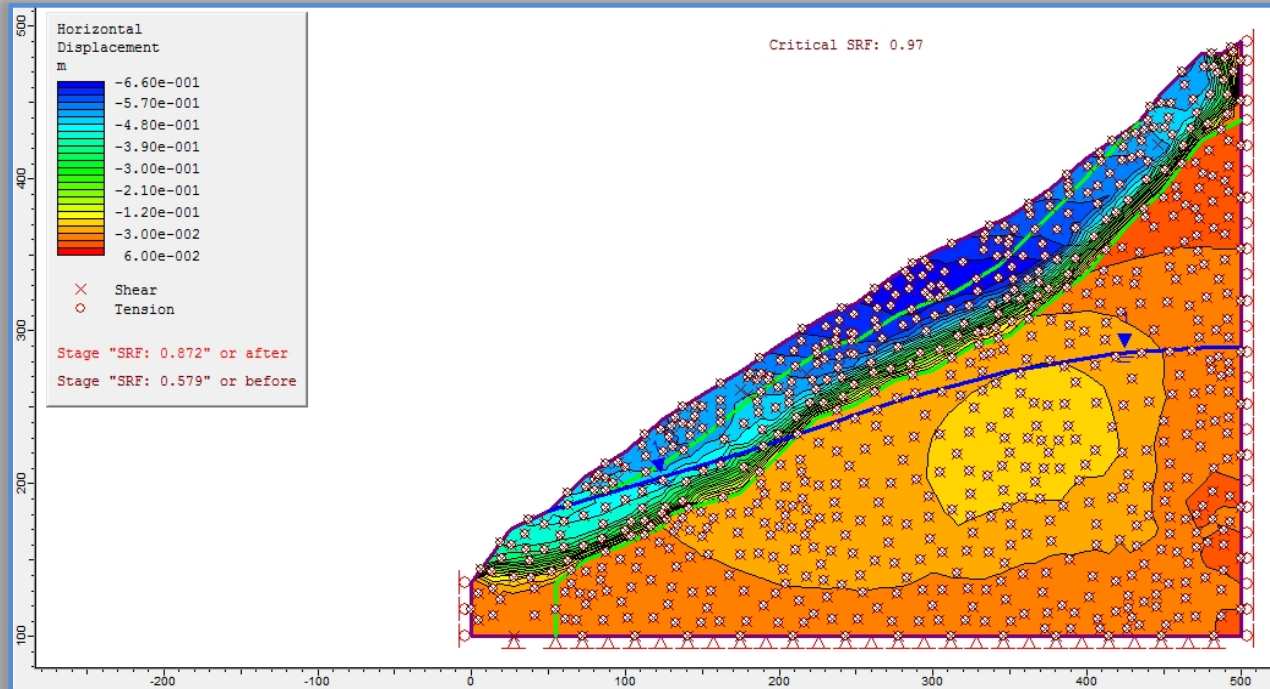


Gráfico 46.- Distribución de esfuerzos de corte – tensión en el talud, se localiza la mayor cantidad en la zona de desplazamientos.

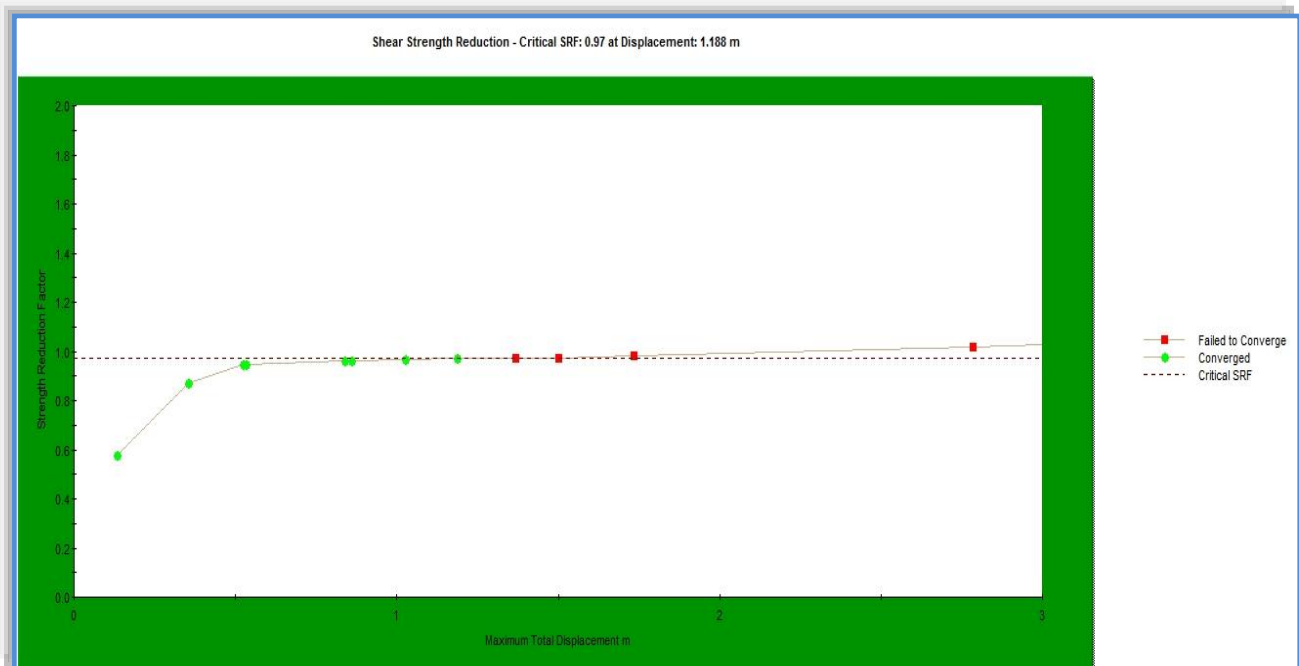


Gráfico 47.- Desplazamiento absoluto producto de la reducción del esfuerzo cortante en el talud, el valor que se desplazaría es de 1,18 m de producirse el movimiento.

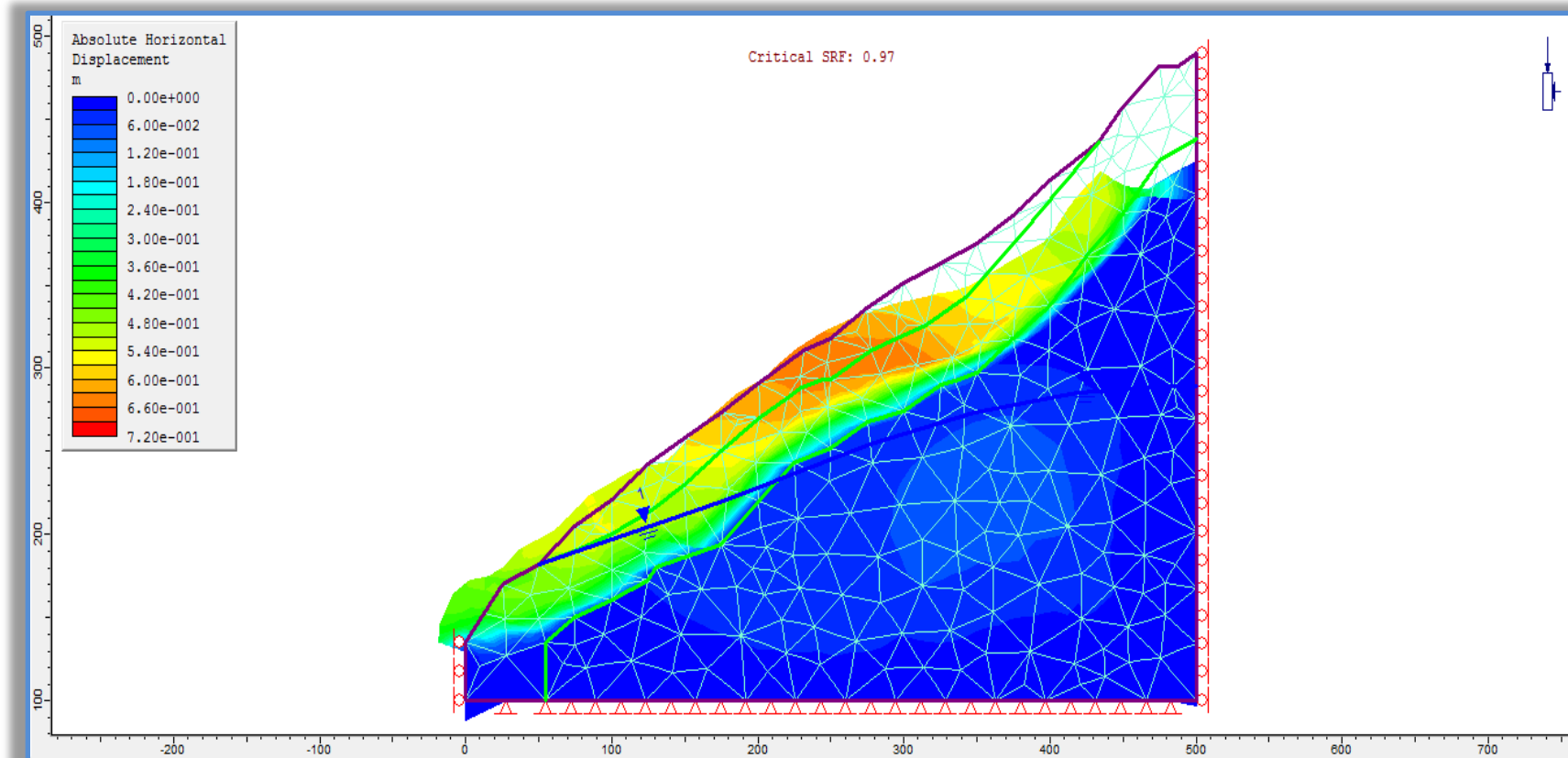


Gráfico 48.- Modelación del contorno inicial del talud y el contorno final a causa de un posible deslizamiento, al tener un FS menor a la unidad se produce el movimiento de la masa. En el gráfico se observa también la malla original al aplicar la reducción del cortante y la situación final posterior al movimiento. El desplazamiento que se da es de 1,118 m.

6.7.3 Condiciones originales del perfil aplicando coeficientes sísmicos

En este punto se analiza el comportamiento del talud con el MEF en condiciones pseu-estáticas con sismos de 0.24 g que, conforme lo señalado anteriormente, este valor corresponde a un sismo similar a una magnitud de 7 grados, de igual manera se verifica al movimiento para un sismo de menor magnitud con una aceleración de 0.12 g.

En el gráfico 49 se observa las zonas donde se aplicaría el máximo esfuerzo cortante por un sismo de 0.12g. Con un sismo de esta magnitud se produciría un deslizamiento en el talud, en el gráfico se indica el contorno original antes del sismo y las condiciones del talud después del mismo.

En el gráfico 50 se observa las zonas en donde se producirían desplazamientos de ocurrir un sismo de 0.24 g, al igual que con la modelación del sismo anterior provocaría un descenso del material y generaría planos de falla diferentes, la zona de color rojo es la más afectada.

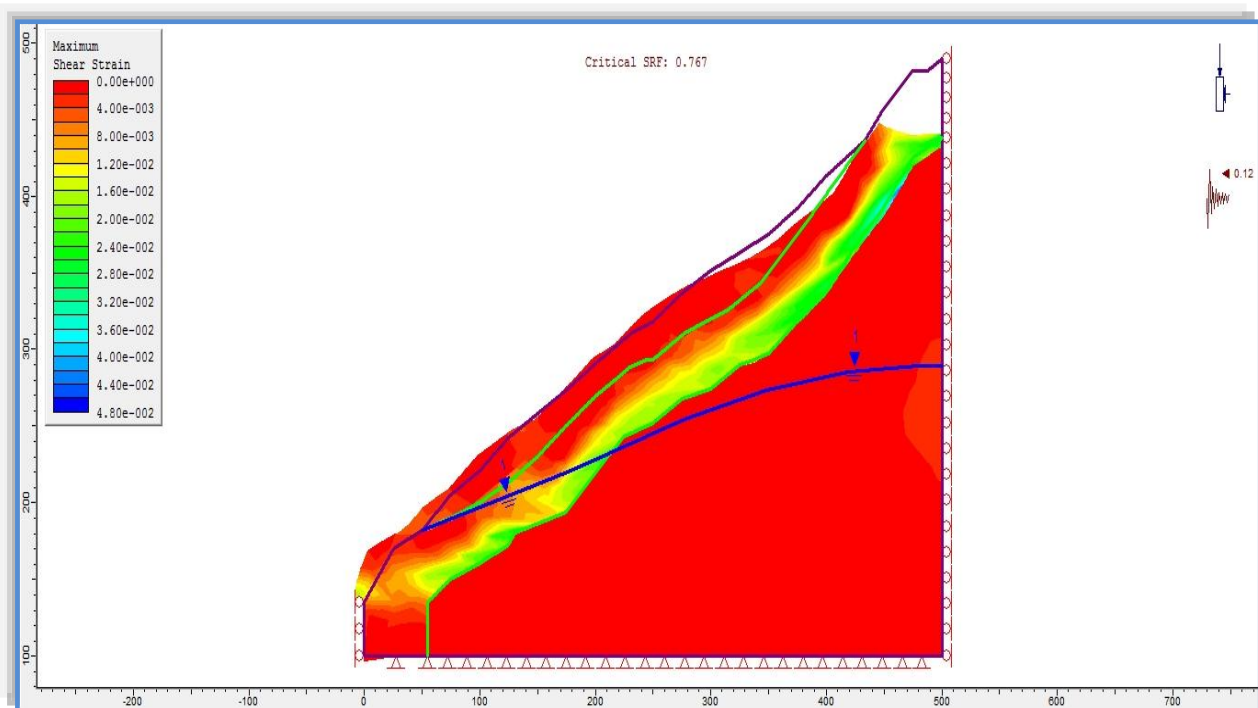


Gráfico 49.- Desplazamiento producto de un evento sísmico. Contorno antes y después de producirse un sismo de magnitud 0,12 g.

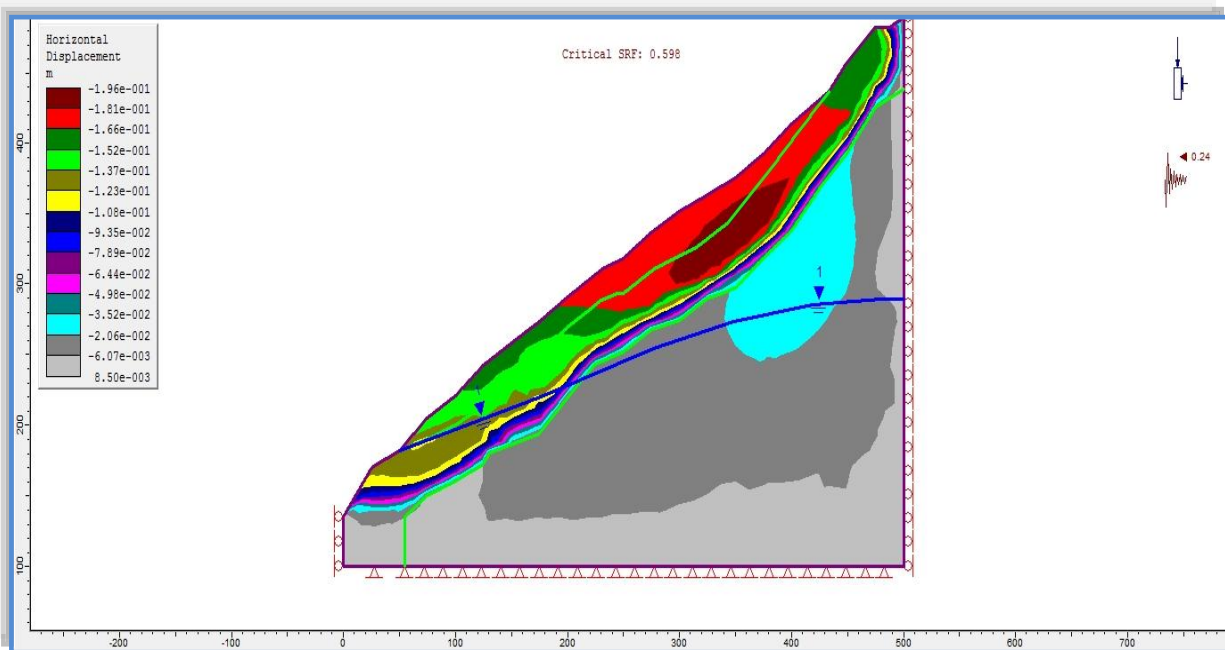


Gráfico 50.- Zonas en donde se produciría desplazamientos a causa de un sismo de 0.24g, se identifican también los posibles planos de falla del talud.

6.7.4 Factor de seguridad en función de diferentes niveles freáticos

Al igual que con el MEL, se realizó una variación de las profundidades de nivel freático, desde los 62 m de profundidad hasta llegar a la condición más crítica en la cual el nivel de agua se encuentre en la superficie del terreno, en base a esta variación se realizó una curva de relación entre la disminución del factor de seguridad en función de la profundidad a la que se puede localizar el nivel en diferentes condiciones. Los gráficos con sus respectivos factores de seguridad fruto de la reducción del esfuerzo cortante y la profundidad de los niveles freáticos se puede observar en el anexo 16.

En el gráfico 51 se puede observar la disminución del factor de seguridad calculado por la reducción del cortante conforme el nivel freático aumenta hasta llegar a su punto más crítico en la superficie del suelo. Con este método, realizando el análisis del perfil, este es inestable y fracasaría.

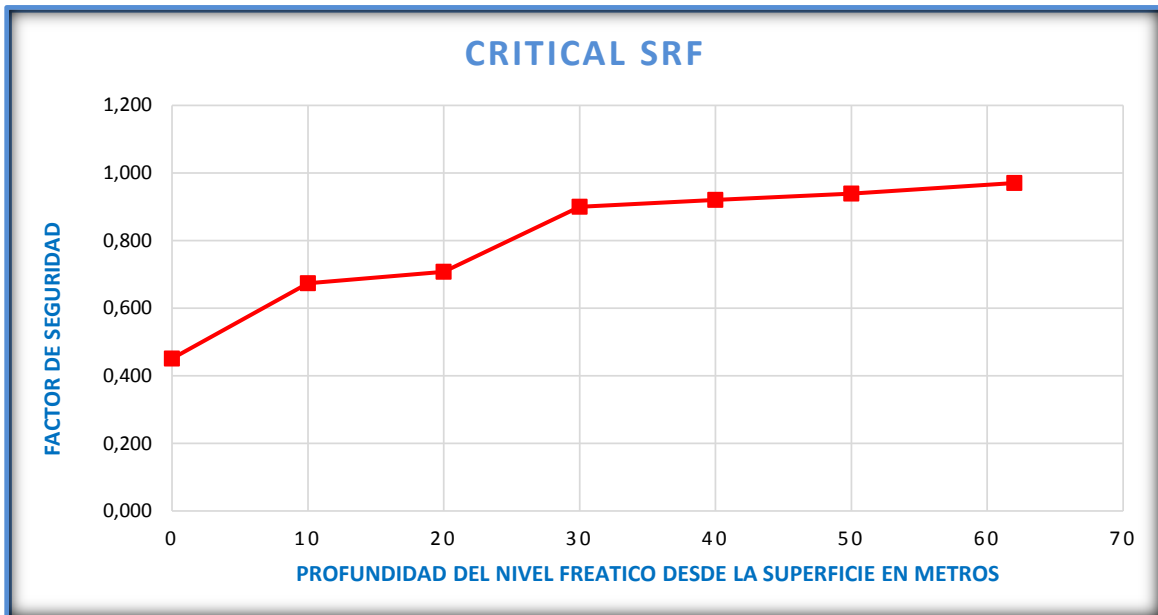


Gráfico 51.- Alteración del FS fruto de la reducción del esfuerzo cortante a causa de la variación del nivel freático en el talud, el gráfico guarda similitud con el MEL.

6.8 Comparación de resultados entre los métodos aplicados

En el MEF, mediante la técnica de reducción a la resistencia cortante (SRM), adicional a identificar una superficie de deslizamiento, su objetivo es identificar un mecanismo de falla del talud. Los resultados de la modelación nos ayudan a interpretar como está evolucionando ese mecanismo, determinando zonas de plasticidad que permiten determinar los lugares por los cuales fracasaría el talud, estos resultados son en función de los parámetros físicos – mecánicos de cada material, adicional a estos los Módulos Elásticos y Coeficiente de Poisson ayudan a modelar al talud en base a un criterio de plasticidad, en base a este criterio se encuentra un factor de seguridad.

En el MEL, aplicando el Método de GLE/ Morgenstern-Price, se tiene previamente identificado un plano de falla que es por donde presumiblemente va a producirse el deslizamiento de talud, en base a este criterio con los parámetros físicos mecánicos descritos anteriormente se busca un FS en las condiciones originales del talud.

Con los dos métodos el criterio de rotura aplicado, fue el lineal de Mohr-Coulomb, en el mismo el ángulo de fricción interna y la cohesión permanecen constantes.

Los resultados difieren notoriamente entre ambos métodos, esto se debe principalmente a que en el caso del MEL se está realizando el cálculo en la capa superficial que es una Capa de suelos coluviales con presencia de clastos, aplicando un plano de falla prácticamente en el contacto entre la capa del suelo y la capa I que corresponde a la de coluvial grueso con roca de baja calidad, mientras que en el caso de MEF al realizar el análisis tenso – deformacional se está considerando la plastificación de la capa I que tiene presencia de roca, siendo este lugar en el cual se identifica las máximas deformaciones en cada análisis realizado.

En la tabla 19, se observan los factores de seguridad fruto de los análisis realizados en las diferentes condiciones del perfil, tanto por nivel freático así como por sismos posibles, de igual forma el porcentaje de diferencia del factor de seguridad entre uno y otro método.

Perfil	Condiciones del análisis	Método aplicado		% Diferencia
		MEL	MEF	
PERFIL B - B	ANÁLISIS EN CONDICIONES ORIGINALES	1,187	0,970	18,28%
	ANÁLISIS CON COEFICIENTE SISMICO DE 0.12	0,954	0,757	20,65%
	ANÁLISIS CON COEFICIENTE SISMICO DE 0.24	0,786	0,598	23,92%
	ANÁLISIS CON NIVEL FREÁTICO A 50 METROS DE LA SUPERFICIE	1,157	0,939	18,84%
	ANÁLISIS CON NIVEL FREÁTICO A 40 METROS DE LA SUPERFICIE	1,105	0,920	16,74%
	ANÁLISIS CON NIVEL FREÁTICO A 30 METROS DE LA SUPERFICIE	1,060	0,900	15,09%
	ANÁLISIS CON NIVEL FREÁTICO A 20 METROS DE LA SUPERFICIE	0,823	0,708	13,97%
	ANÁLISIS CON NIVEL FREÁTICO A 10 METROS DE LA SUPERFICIE	0,716	0,674	5,87%
	ANÁLISIS CON NIVEL FREÁTICO SOBRE LA SUPERFICIE	0,484	0,451	6,82%

Tabla 19.- Cuadro comparativo del resultado de los análisis con diferentes condiciones en La Ermita Sur.

6.9 Comparación de resultados entre plano de falla asumido y el calculado

En el MEL, aplicando el Método de GLE/ Morgenstern-Price, se buscó planos de fallas y se comparó con el que se tenía previamente que es por donde presumiblemente va a producirse el deslizamiento de talud y en base a este criterio con los parámetros físicos mecánicos descritos anteriormente se buscaron los FS en las condiciones originales del talud.

Los resultados difieren entre si según la profundidad del nivel freático, siendo los planos de falla calculados por el programa los que identificaron FS críticos para el talud, mientras el plano de falla asumido en función de las perforaciones mostro una mayor estabilidad del talud.



En la tabla 20, se observan los factores de seguridad fruto de los análisis realizados en las diferentes condiciones del talud, tanto por nivel freático así como por sismos posibles, para el plano de falla asumido y los calculados, de igual forma el porcentaje de diferencia del factor de seguridad entre uno y otro según el plano.

Perfil	Condiciones del análisis	Método aplicado MEL		% Diferencia
		Plano de falla asumido	Plano de falla calculado	
PERFIL B - B	ANÁLISIS EN CONDICIONES ORIGINALES	1,285	1,187	7,63%
	ANÁLISIS CON COEFICIENTE SISMICO DE 0.12	1,031	0,954	7,47%
	ANÁLISIS CON COEFICIENTE SISMICO DE 0.24	0,848	0,786	7,31%
	ANÁLISIS CON NIVEL FREÁTICO A 50 METROS DE LA SUPERFICIE	1,277	1,157	9,40%
	ANÁLISIS CON NIVEL FREÁTICO A 40 METROS DE LA SUPERFICIE	1,224	1,105	9,72%
	ANÁLISIS CON NIVEL FREÁTICO A 30 METROS DE LA SUPERFICIE	1,170	1,060	9,40%
	ANÁLISIS CON NIVEL FREÁTICO A 20 METROS DE LA SUPERFICIE	0,934	0,823	11,88%
	ANÁLISIS CON NIVEL FREÁTICO A 10 METROS DE LA SUPERFICIE	0,839	0,716	14,66%
	ANÁLISIS CON NIVEL FREÁTICO SOBRE LA SUPERFICIE	0,746	0,484	35,12%

Tabla 20.- Cuadro comparativo del resultado de los análisis con el plano de falla inferido y plano de falla calculado en diferentes condiciones de nivel freático.

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- La recopilación de la información realizada, tanto de perforaciones, geología de la zona, hidrología, geofísica, así como las visitas al campo efectuadas, sumado al procesamiento de los datos conseguidos por medios computacionales se obtuvo una imagen real del modelo geológico del deslizamiento, se identificaron zonas con mayor inestabilidad y se encontraron los factores desencadenantes para este movimiento.
- Los análisis de estabilidad realizados sobre el modelo geológico mencionado tanto con el programa Slide 5.0 (MEL) así como con el Phase 2 (MEF), ayudaron a determinar factores que afectan a la estabilidad, al analizar el incremento del nivel freático en ambos casos se observó la disminución notable del factor de seguridad, esto en función de las formaciones involucradas. El factor de seguridad que en condiciones normales por medio del programa Slide 5.0 con un nivel freático localizado sobre los 60 metros de profundidad arrojó un FS de 1.187, el mismo no está acorde a los requerimientos de HIDROPAUTE para este tipo de taludes por la ubicación y el riesgo que representa un deslizamiento para la presa, el recomendable debe superar al FS = 1.5. Con este análisis se confirmó nuestra hipótesis de que el agua era uno de los factores desencadenantes.
- Utilizando el programa Slide, para encontrar el FS, se modeló con un plano de falla real identificado de las perforaciones realizadas en la zona, el mismo que se da en el contacto entre los estratos de la capa superficial y la capa I, al aplicar el programa Phase 2 se verificó que las zonas de mayor plastificación se daría por este plano de falla, teniendo concordancia directa entre los dos programas con las zonas inestables, no así en los factores de seguridad ya que existe una diferencia notable entre los dos métodos, esto principalmente ya que la zona de plastificación del talud con Phase 2 identificó la capa con roca débil es decir la capa I, mientras que en Slide la zona débil es la capa superficial.
- Por medio de los dos programas se verificó que al producirse un sismo con una aceleración de 0.12 g se ocasionaría un fallo en el talud ya que el factor de seguridad perdería su equilibrio, más aún de ocurrir un sismo de 0,24 g generaría el desplazamiento del talud.

- Con el programa Slide aplicando la opción de retroanálisis por el método de sensibilidad se pudo encontrar los valores de c y ϕ con los cuales el factor de seguridad estaría al límite es decir la unidad, con estos datos al realizar el monitoreo se puede tener precaución de llegar a los mismos ya que se afecta directamente la estabilidad. Estos valores corresponden a un $c = 33,49 \text{ KN/m}^2$ y a un $\phi = 25,89^\circ$. Al realizar el diseño de las medidas correctoras, es recomendable utilizar estos parámetros con el objetivo de precautelar la seguridad de la ladera.
- Se definieron las zonas con mayor inestabilidad se identificaron entre las cotas 2200 msnm y 2400 msnm, siendo estas con una alta erosión según las visitas efectuadas al campo.
- En las zonas en las cuales se produjeron desplazamientos de material según los resultados de los inclinómetros, las causas, adicional al aumento del nivel freático producto de la época invernal, se puede inferir que fueron resultados también de las voladuras realizadas en el proceso de construcción de la presa, actualmente esta etapa ha concluido.
- Al aplicar el programa Slide, calculando el FS para el plano de falla asumido ($FS = 1,285$) y comparándole con el que el programa encuentra al modelarlo ($FS = 1,187$) en condiciones originales, se encontró concordancia entre el asumido y el calculado por el programa, siendo el asumido más conservador que el calculado, adicional con el calculado se identificó zonas críticas de falla en los extremos al existir una variación del nivel freático que a su vez tuvo concordancia con la modelación con el programa Phase 2.

7.2 Recomendaciones de estabilización, mitigación y futuras líneas de investigación

- Siendo la presencia del agua una de las causas principales de la inestabilidad de La Ermita Sur, la misma que por la información recopilada provoca en época invernal un aumento de la infiltración, es fundamental el disminuir el volumen del líquido que ingresa al talud; con lo que se recomienda la construcción de geodrenes colocados a diferentes cotas con el propósito de captar esta agua y evitar que sature el suelo provocando la inestabilidad de La Ermita Sur.
- Las obras de construcción de geodrenes no deben modificar notoriamente la geometría actual del talud, realizando mínimo movimiento de tierras, desbroce de vegetación y tapando zanjas con material de sitio.

- De igual forma con el propósito de disminuir la infiltración y la escorrentía de la zona, podemos aumentar la evotranspiración a través de sembríos acorde al medio en el que se encuentra el talud (revegetación de la zona), sin alterar las condiciones actuales del mismo. Para mejorar la evotranspiración se recomienda un plan de reforestación.
- Evitar la erosión en la parte baja del talud ya que generamos puntos de debilidad y zona factibles a la infiltración. Esto se puede lograr por medio de planes que incluyan a la población que habita en la zona, generando plazas de trabajo lo que va a motivar a cuidar la ladera
- Mantener constantemente el monitoreo topográfico ubicando nuevos hitos para complementar los existentes, de igual manera monitoreo e incremento de inclinómetros para un seguimiento adecuado de desplazamientos y los piezómetro para un mejor control del nivel freático en diferentes zonas del talud. Los nuevos hitos se recomienda principalmente en la zona identificada con mayor movimiento.
- Concientizar a la población que habita en la zona en el cuidado y limpieza de cunetas, esto se puede lograr por medio de charlas e incluyéndoles en trabajo en el área.

7.3 Futuros análisis de investigación

Como futuros análisis de investigación se recomiendan realizar:

- Un análisis tridimensional del comportamiento hidrogeológico del material en movimiento, buscando identificar principalmente encharcamientos internos de agua que desestabilizan al talud.
- Una clasificación de la vegetación de la zona buscando identificar la vida vegetal que convenga para disminuir la infiltración y escurrimiento.
- Un estudio adecuado del uso del suelo que se está dando en la zona del deslizamiento y en la parte alta del mismo, con el fin de conocer sobrecargas antrópicas que afecten a la estabilidad del talud.



REFERENCIAS:

- [1] INECEL: Informe Final, Diseños Definitivos C, Estabilización de Taludes. (1984).
- [2] HIDROPAUTE S.A. Diseño de Obras de Estabilización para el Deslizamiento La Ermita Sur. (2009).
- [3] INECEL: Informe Final, Diseños Definitivos, Memoria Ejecutiva, SWECO-INTERNACIONAL AB - BOTCONSULT Cía. Ltda. (1998).
- [4] Gonzales de Vallejo E, Ferrer, Ortuño, Oteo.: INGENIERIA GEOLÓGICA. PEARSON / PRENTICE HALL, 744, (2002).
- [5] Nuñez Del Arco. GEOLOGÍA DEL ECUADOR. Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Escuela Superior Politécnica Del Litoral, **253**, (2003).
- [6] INECEL: Informe Final, Diseños Definitivos, Geología y Geotecnia, SWECO-INTERNACIONAL AB - BOTCONSULT Cía. Ltda. (1998).
- [7] Vásconez F, Análisis de la Peligrosidad de Grandes Deslizamientos en la República del Ecuador, Facultad de Geo – Ciencias, Universidad de Johannes Gutenberg – Maguncia, Junio del 2000.
- [8] HIDROPAUTE S.A. Deslizamiento de La Ermita Sur, 2220G-IT-R28-009-a1, Julio 2007.
- [9] SUÁREZ, Jaime. Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en zonas Tropicales, Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. (1998).
- [10] Braja M.: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, THOMSON LEARNING, **594**, 115, (1999).
- [11] SUÁREZ, Jaime. Deslizamientos, ANÁLISIS GEOTECNICO, Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. **582**, 75, (1998).
- [12] HIDROPAUTE S.A. Deslizamiento de La Ermita Sur. 2220G-IT-Z28-002-a1, Mayo 2007.
- [13] HIDROPAUTE S.A. Deslizamiento de La Ermita Sur. 2220G-IT-R28-003-a1, Abril 2006.



- [14] HIDROPAUTE S.A. Deslizamiento de La Ermita Sur. 2220G-IT-Z28-002-a1, Junio 2007.
- [15] HIDROPAUTE S.A. CENTRAL HIDROELÉCTRICA PAUTE – MAZAR. Monitoreo Informe Anual 2012. Enero del 2013.
- [16] HIDROPAUTE S.A. PROYECTO BÁSICO. Informe de Geofísica, Sísmica de Refracción y Resistividad Eléctrica Sector “LA ERMITA” 2220G-IT-IOO-001. Abril 2005.
- [17] ALVAREZ, Alfonso. Geofísica Aplicada en los Proyectos Básicos de Ingeniería Civil, Instituto Mexicano del transporte. **83**, 48, 49, (2003).
- [18] HIDROPAUTE S.A. Deslizamiento de La Ermita Sur, Informe de Perforaciones, Sondeo PE- 8, Mayo 2007.
- [19] ROCSCIENCE. SLIDE 5.0.: Guía rápida del usuario. 2010.
- [20] ROCSCIENCE. PHASE 2.: Guía rápida del usuario. 2010.



ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Mapa geológico de la zona

ANEXO 2: Factores influyentes en la estabilidad de una ladera

ANEXO 3: Influencia de los diferentes factores en las condiciones de los materiales y las laderas

ANEXO 4: Influencia de los diferentes factores en el comportamiento geomecánico de los materiales que conforman una ladera

ANEXO 5: Registro de precipitaciones, infiltración, evotranspiración y escurrimiento presentes en la zona

ANEXO 6: Cuadro de las perforaciones y sus características

ANEXO 7: Mapa de ubicación de las perforaciones

ANEXO 8: Registro de las perforaciones PE – 8

ANEXO 9: Variaciones del nivel freático registrado en la perforaciones

ANEXO 10: Registro de actividades en hitos topográficos

ANEXO 11: Mapa de ubicación de hitos topográficos primer grupo (2005 – 2007)

ANEXO 12: Mapa de ubicación de hitos topográficos segundo grupo (2010)

ANEXO 13: Mapa de ubicación de investigación geofísica realizada

ANEXO 14: Mapa de ubicación de perfiles realizados en la zona

ANEXO 15: Variación del factor de seguridad en función del nivel freático utilizando el programa Slide aplicando MEL

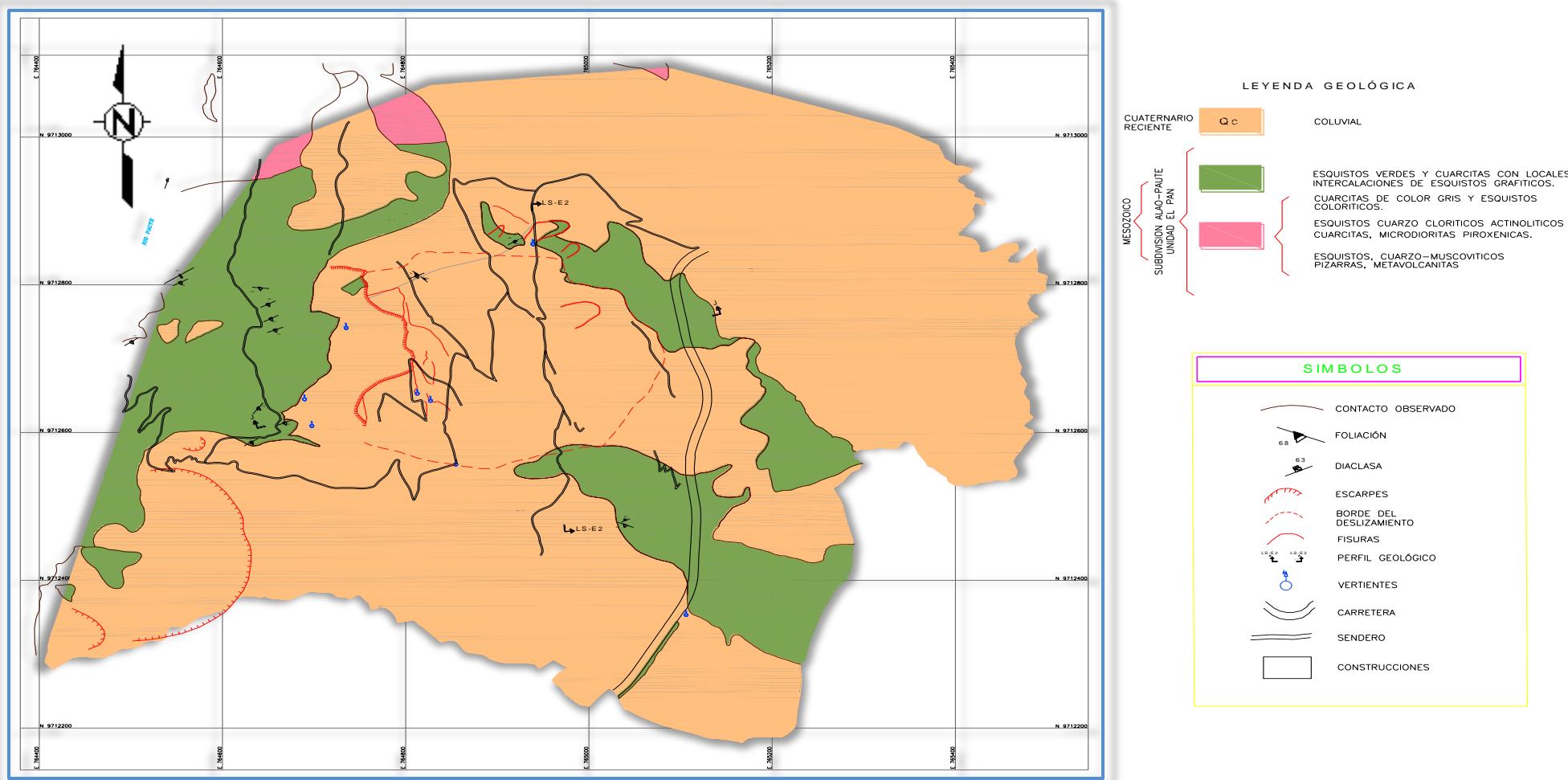
ANEXO 16: Variación del factor de seguridad en función del nivel freático utilizando el programa Phase 2 aplicando MEF

ANEXO 17: Variación del factor de seguridad en función del nivel freático utilizando el programa Slide aplicando el MEL para el plano de falla asumido en el talud



ANEXO 1:

MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA



Anexo 1: Mapa geológico de la zona en estudio La Ermita Sur



ANEXO 2, 3 Y 4:

FACTORES INFLUYENTES EN LA ESTABILIDAD DE UNA LADERA

<i>Factores Condicionantes</i>	<i>Factores Desencadenantes</i>
<i>-Estratigrafía y litología</i>	<i>-Sobrecargas sísmicas</i>
<i>-Estructura geológica</i>	<i>-Cargas dinámicas</i>
<i>-Condiciones hidrogeológicas y comportamiento</i>	<i>-Cambios en las condiciones hidrogeológicas</i>
<i>.-Hidrogeología de los materiales</i>	<i>-Factores climáticos</i>
<i>-Propiedades físicas, resistentes y deformacionales</i>	<i>-Variaciones en la geometría</i>
<i>-Tensiones naturales y estado tenso - deformacional</i>	<i>-Reducción de parámetros resistentes</i>

Anexo 2: Factores influyentes en la estabilidad de una ladera. (Ingeniería Geológica, Gonzales de Vallejo. 2004). Los resaltados con color rojo son los factores que afectan la zona en estudio.

	Factores	Influencias y efectos
Condicionantes	Relieve (pendientes, geometría)	Distribución del peso del terreno
	Litología (Composición, textura)	Densidad, resistencia. Comportamiento hidrogeológico
	Estructura geológica y estado tensional	Resistencia, deformabilidad. Comportamiento discontinuo y anisótropo. Zonas de debilidad
	Propiedades geomecánicas de los materiales	Comportamiento hidrogeológico. Generación de presiones intersticiales.
	Deforestación	Modificación en el balance hídrico. Erosión.
	Meteorización	Cambios físicos y químicos, erosión externa e interna, generación de zonas de debilidad.
Desencadenantes	Precipitaciones y aportes de agua	Variación de las presiones intersticiales y del peso del terreno.
	Cambio en las condiciones hidrológicas	Saturación en suelos. Erosión.
	Aplicación de cargas estáticas y dinámicas	Cambio en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera. Incremento de presiones intersticiales.
	Cambios morfológicos y de geometría en las laderas	Variación de las fuerzas debidas al peso. Cambio en el estado tensional
	Erosión o socavación del pie	Cambios geométricos en la ladera. Cambios en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera
	Acciones climáticas (procesos de deshielo, heladas, sequías)	Cambio en el contenido de agua del terreno. Generación de grietas y planos de debilidad. Disminución de las propiedades resistentes.

Anexo 3: Influencia de los diferentes factores en las condiciones de los materiales y las laderas. (Ingeniería Geológica, Gonzales de Vallejo. 2004). Los resaltados con color rojo son los factores que afectan la zona en estudio.



<i>Reducción de la resistencia al corte</i>	<i>Aumento de los esfuerzos de corte</i>
<p>Condiciones iniciales:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Composición, textura y estructura. -Fracturas y fallas. -Planos de estratificación y de foliación. -Zonas de brechas. -Rocas masivas sobre materiales plásticos. -Alternancia de materiales con diferente permeabilidad. <p>Cambios en los materiales por meteorización y reacciones físico-químicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Desintegración física de rocas. -Hidratación de minerales arcillosos. -Desecación de arcillas y de rocas arcillosas. -Disolución y lavado de materiales. -Plastificación de arcillas. <p>Cambios en las fuerzas intergranulares debidas al agua y presiones de agua en poros y fracturas:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Precipitaciones. -Deshielo. -Lagos y embalses. -Riego. -Deforestación. <p>Cambios en la estructura:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Por figuración en pizarras y arcillas sobreconsolidadas. -Por relajación de tensiones en laderas rocosas en valles o excavaciones. -Por remoldeo de suelos finos (arenas, loess) y arcillas sensitivas. <p>Debilitamiento de la resistencia debido a procesos lentos de movimiento.</p> <p>Acción de las raíces de árboles y arbustos.</p> <p>Excavación de madrigueras de animales.</p>	<p>Actuación de los esfuerzos transitorios:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Movimientos sísmicos. -Vibraciones por voladuras, maquinarias y tráfico. -Deslizamientos cercanos. <p>Perdida de confinamiento lateral y en la base de las laderas:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Erosión del pie de las laderas por ríos arroyos. -Lluvias. -Erosión interna o subterránea. -Disolución y lavado del material. -Minería en la zona. -Presencia de materiales plásticos infrayacentes. <p>Cambios en la morfología:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Deslizamientos. -Grandes fallas. <p>Sobrecargas naturales:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Peso de lluvia y agua de acuíferos. -Acumulación de derrubios, coluviones o masas deslizadas. -Vegetación. <p>Sobrecargas antrópicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Rellenos, escombreras y acopio de materiales. -Edificios y estructuras. -Cultivos y riego de laderas. -Excavaciones. -Retirada de elementos de contención. -Construcción de embalses y lagos. <p>Presión lateral:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Agua en grietas y cavidades. -Hielo en grietas. -Presencia de materiales expansivos. -Movilización de esfuerzos residuales. -Procesos volcánicos.

Anexo 4: Influencia de los diferentes factores en el comportamiento geomecánico de los materiales que conforman una ladera. (Ingeniería Geológica, Gonzales de Vallejo. 2004).



ANEXO 5:

**REGISTRO DE PRECIPITACIONES, INFILTRACIÓN,
EVOTRANSPIRACION Y ESCURRIMIENTO
PRESENTES EN LA ZONA, TABLA 3.**



PRECIPITACIÓN PROMEDIO MENSUAL Y ANUAL REGISTRADA EN LA ERMITA SUR				
MES	PRECIPITACION REGISTRADA (mm)	EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm)	ESCURRIMIENTO DIRECTO (mm)	INFILTRACION (mm)
Enero	168,6	71,2	37	60
Febrero	180,5	62,8	44	74
Marzo	219,9	69,8	68	83
Abril	272,8	66,1	104	103
Mayo	358,9	66,4	169	124
Junio	502,3	56,3	289	157
Julio	479,4	54,9	269	155
Agosto	358,5	59,6	169	130
Septiembre	282,2	61,6	110	110
Octubre	208,7	71,5	60	77
Noviembre	167,7	70,5	37	60
Diciembre	143,5	70,5	25	48
Σ Total Anual	3343,0	781,2	1381	1181
% correspondiente	100%	23,4%	41,3%	35,3%

Tabla 3: Registro de precipitaciones, evapotranspiración, escurrimiento e infiltración registrados en La Ermita Sur, datos proporcionados y recopilados por HIDROPAUTE [2], tabla adaptada para el presente trabajo.



ANEXO 6:

CUADRO DE LAS PERFORACIONES Y SUS CARACTERÍSTICAS



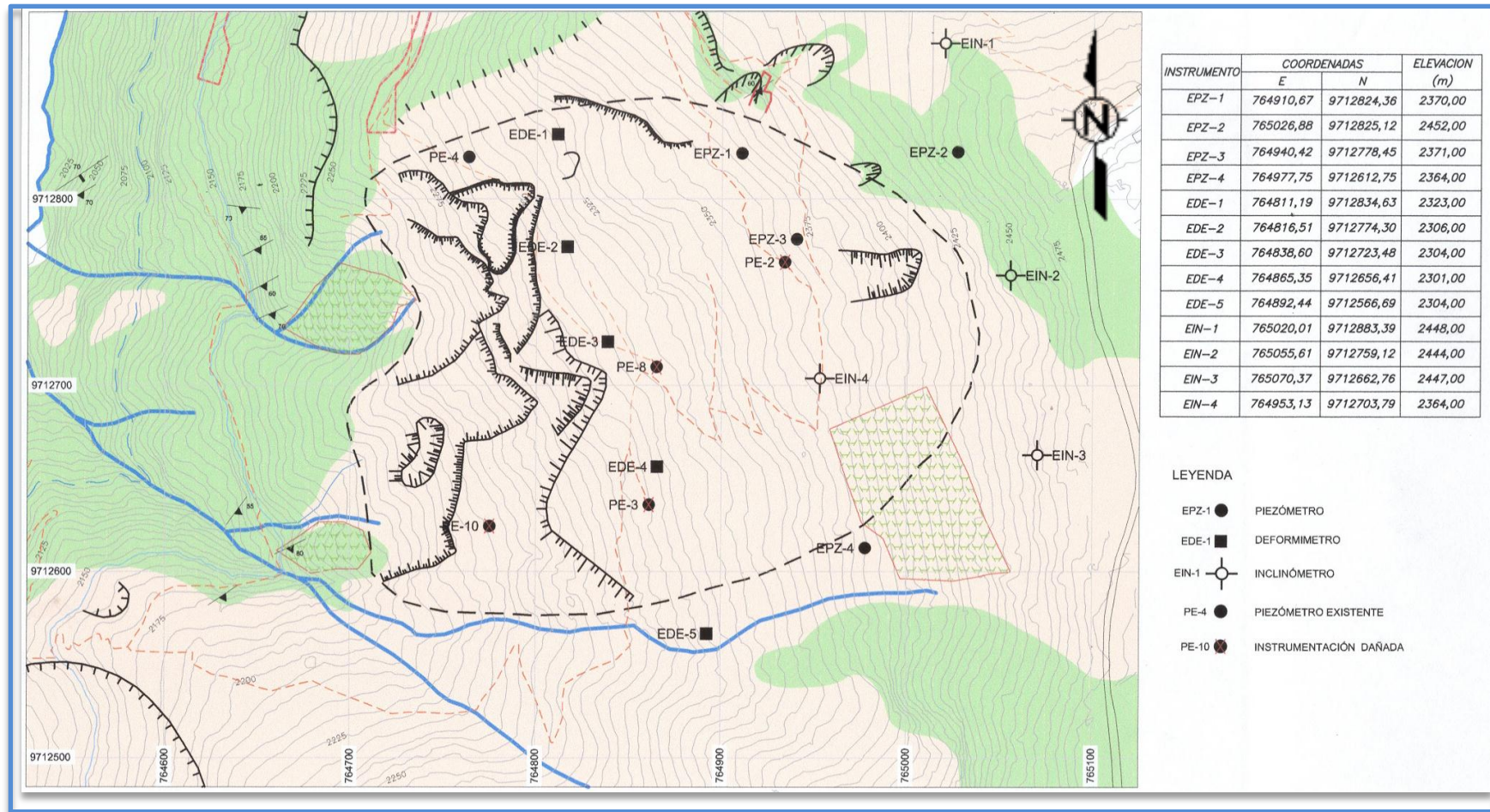
PERFORACIÓN	COORDENADAS	COTA	PROFUNDIDA D	LITOLOGÍA		PRINCIPALES TRAMOS DE ROCA FRAGMENTADA Y ALTERADA
	NORTE Y ESTE	(msnm)	(m)	Coluvial (m)	Roca (m)	
PE-1	9 712 756,028 N 764 828,281 E	2 305,56	100	0,0 a 15,8	15,8 a 100	15,8 a 21; 27,5 a 30; 35,7 a 46
PE-2	9 712 766,144 N 764 933,968 E	2 360,692	100	0,0 a 28,6	28,6 a 100	28,6 a 34; 37 a 38,5; 44 a 45,7; 51,7 a 53,2; 58,2 a 60; 73 a 75; 80 a 81
PE-3	9 712 636,152 N 764 861,287 E	2 294,49	100	0,0 a 19,0	19 a 100	19 a 23,3; 26,5 a 36; 38,5 a 50; 55,4 a 57; 61,5 a 64; 81,5 a 85,5
PE-4	9 712 828,393 N 764 792,260 E	2 311,284	81,3	0,0 a 12,25	12,25 a 81,3	Roca fragmentada hasta los 62 metros de profundidad
PE-8	9 712 716,278 N 764 861,303 E	2 311,132	100	0,0 a 21,15	21,15 a 100	Roca fragmentada hasta los 65 metros de profundidad
PE-10	9 712 626,462 N 764 771,562 E	2 234,517	70	0,0 a 39,2	39,20 a 70	18 a 39
PE-11	9 712 701,276 N 764 806,050 E	2 281,693	100	0,0 a 30,75	30,75 a 100	57 a 60,5; 67,6 a 70; 73 a 74
EPZ-1	9 712 868,592 N 764 859,520 E	2 366,61	95	0,0 a 8,7	8,7 a 95	Ninguno relacionado con el deslizamiento La Ermita Sur
EPZ-2	9 712 648,026 N 765 094,648 E	2 457,975	85	0,0 a 4,4	4,4 a 85	Roca descomprimida hasta los 53 metros de profundidad
EPZ-3	9 712 750,878 N 765 047,135 E	2 430,843	100	0,0 a 7,0	7,0 a 100	Múltiples hasta los 17 metros de profundidad
EPZ-4	9 712 703,075 N 764 956,024 E	2 362,47	24	0,0 a 21,9	21,9 a 24	Ninguno evidente.
EIN-1	9 712 877,538 N 765 017,578 E	2 440,363	101	0,0 a 2,0	2,0 a 101	Roca fracturada hasta los 47 metros de profundidad
EIN-4	9 712 782,075 N 764 949,626 E	2 375,399	100	0,0 a 32,8	32,8 a 100	38 a 40; 45,15 a 46; 51,5 a 53,6; 54,5 a 59; 62,5 a 71
EIN-5	9 712 609,839 N 764 980,040 E	2 366,27	100	0,0 a 16,7	16,7 a 100	16,5 a 24; 28,6 a 30; 78,6 a 80; 85,7 a 87,3; 88 a 89,4

Anexo 6: Perforaciones realizadas en la zona y características de las mismas. Datos proporcionados por HIDROPAUTE y adaptados al presente trabajo [2].



ANEXO 7:

MAPA DE UBICACIÓN DE LAS PERFORACIONES



Anexo 7: Ubicación de las perforaciones. Mapa proporcionado por HIDROPAUTE y adaptado al presente trabajo [2].



ANEXO 8:

REGISTRO DE LAS PERFORACIONES PE - 8



CONSORCIO GERENCIA MAZAR				PROYECTO HIDROELÉCTRICO MAZAR				HIDGECO							
REGISTRO DE PERFORACIÓN				SONDEO:	PE - 8	UBICACIÓN:	DESPLAZAMIENTO ERMITA SUR		HOJA:	1	DE:	10			
COORDENADAS: N: 9712.716,278				COTA (msnm):	2311,132	ORIENTACIÓN:	INCLINACIÓN R.H.: 90°								
E: 764.861,303				PROFUNDIDAD (m):	100,00										
FECHA INICIO: 31-mar-07				DIÁMETRO SONDEO (mm):	96,00	DE: 0,00	A: 39,50	DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm):	114,3 x 1016 DE 0,0 a 39,5 m						
FECHA FINAL: 03-may-07				DIÁMETRO SONDEO (mm):	75,70	DE: 39,50	A: 100,00	DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm):	88,9 x 80,9 DE 0,0 a 100,0 m						
JEFE DE CAMPO: Ing. M. Heredia				DIÁMETRO NÚCLEO (mm):	63,50	DE: 0,00	A: 39,50	DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm):							
FISCALIZADOR: Ing. B. Vásconez				DIÁMETRO NÚCLEO (mm):	47,60	DE: 39,5	A: 100,00	DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm):							
PROFUNDIDAD (m)	COTA (msnm)	NIVEL AGUA (m)	FECHA	REGISTRO GEOLÓGICO		RECUPERACIÓN	R.Q.D.	METEORIZACIÓN	FRACTURAMIENTO	CONDUCTIVIDAD	HIDRÁULICA (H)	FLUJO DE RETORNO	CAJA N°	REVESTIMIENTO	INSTRUMENTACIÓN
0,00	2.311,13			SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN										
1,0	2.310,13				COLUVIAL FRACCION FINA (60%): Limo arcilloso, color marrón, de plasticidad media a baja, oxidado, de humedad media a baja. Se destaca presencia de un bajo porcentaje de arena, color marrón, predominantemente de grano grueso. FRACCION GRUESA (40%): Gravas(25%), Bloques (15%). FRAGMENTOS :De color marrón y gris verdoso, de mediana a altamente meteorizados, de formas subangulosas, con tamaños que oscilan entre 1 y 6 cm, predominando los de 5 - 6 cm, gravas y bloques de 12 cm, los mismos que contienen clorita y óxidos en sus fracturas.										
2,0	2.309,13														
3,0	2.308,13														
4,0	2.307,13														
5,0	2.306,13														
6,0	2.305,13														
6,60		6,60 m.													
7,0	2.304,13		4 - abr												
8,0	2.303,13														
9,0	2.302,13														
10,0	2.301,13														
A partir de los 7,00 m, los fragmentos son metamórficos (esquistos), tanto las gravas como los bloques, toman una coloración grisácea y son medianamente meteorizados.															
COLOCACION DE TUBERIA DEL INCLINOMETRO DE 0,00 A 100,00 m.															

RECUPERACIÓN (%)		ROD (%)		METEORIZACIÓN		FRACTURAMIENTO (f./m)		FLUJO RETORNO (%)		CONDUC. HIDRÁULICA (cm seg)	
1	100-91	1	100-91	1	Roca fresca	1	<2 Roca masiza	1	Muy alto	H1	<10 E-7
2	80-61	2	90-76	2	Ligeramente meteo.	2	2-5 Roca fracturada	2	Alto	H2	11E-7 A 10 E-6
3	60-41	3	75-51	3	Medianamente meteo.	3	6-10 Roca muy fracturada	3	Medio	H3	11E-6 A 10 E-4
4	40-21	4	50-26	4	Altamente meteo.	4	11-20 Extremadamente frac.	4	Bajo	H4	11E-4 A 10 E-2
5	20-0	5	25-0	5	Completamente meteo.	5	>20 Roca fragmentada	5	Muy bajo	H5	11E-2 A 1E-0



CONSORCIO GERENCIA MAZAR				PROYECTO HIDROELÉCTRICO MAZAR				HIOGECO							
REGISTRO DE PERFORACIÓN				SONDEO:	PE - 8	UBICACIÓN:	DESPLAZAMIENTO ERMITA SUR	HOJA: 2 DE: 10							
COORDENADAS: N: 9712.716,278				COTA (msnm):	2311,132	ORIENTACIÓN:	INCLINACIÓN R.H.: 90°								
E: 764.861,303				PROFUNDIDAD (m):	100,00										
FECHA INICIO: 31-mar-07				DIÁMETRO SONDEO (mm):	96,00	DE: 0,00	A: 39,50	DIÁMETRO REVESTIMIENTO(mm): 114,3 x 101,6 DE 0,0 a 39,5 m							
FECHA FINAL: 03-may-07				DIÁMETRO SONDEO (mm):	75,70	DE: 39,50	A: 100,00	DIÁMETRO REVESTIMIENTO(mm): 88,9 x 80,9 DE 0,0 a 100,0 m							
JEFE DE CAMPO: Ing. M. Heredia				DIÁMETRO NÚCLEO (mm):	63,50	DE: 0,00	A: 39,50	DIÁMETRO REVESTIMIENTO(mm):							
FISCALIZADOR: Ing. B. Vásquez				DIÁMETRO NÚCLEO (mm):	47,60	DE: 39,50	A: 100,00	DIÁMETRO REVESTIMIENTO(mm):							
PROFUNDIDAD (m)	COTA (msnm)	NIVEL AGUA (m)	FECHA	REGISTRO GEOLÓGICO		RECUPERACIÓN	R.Q.D.	METEORIZACIÓN	FRAGMENTACIÓN	CONDUCTIVIDAD	HIDRAULICA (H)	FLUJO DE RETORNO	CAJA N°	REVESTIMIENTO	INSTRUMENTACIÓN
10,00	2.301,13			SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5		
11,0	2.300,13														
12,0	2.299,13														
13,0	2.298,13														
14,0	2.297,13														
15,0	2.296,13														
16,0	2.295,13														
17,0	2.294,13														
18,0	2.293,13														
19,0	2.292,13														
20,0	2.291,13														
A partir de los 7.00 m, los fragmentos son metamórficos (esquistos), tanto las gravas como los bloques, toman una coloración grisácea y son medianamente meteorizados.															
COLOCACION DE TUBERIA DEL INCLINOMETRO DE 0,00 A 100,00 m.															

LEYENDA

RECUPERACION (%)	RQD (%)	METEORIZACION	FRAGMENTAMIENTO (t/m)	FLUJO RETORNO (%)	CONDUCT. HIDRAULICA (cm/seg)
1 100-81 Excelente	1 100-91 Excelente	1 Roca fresca	1 <2 Roca maciza	1 Muy alto	H1 <10 E-7
2 80-61 Buena	2 90-76 Buena	2 Ligeramente meteo.	2 2-5 Roca fracturada	2 Alto	H2 11E-7 A 10 E-5
3 60-41 Regular	3 75-51 Regular	3 Medianamente meteo.	3 6-10 Roca muy fracturada	3 Medio	H3 11E-5 A 10 E-4
4 40-21 Baja	4 50-26 Bajo	4 Altamente meteo.	4 11-20 Extremadamente frac.	4 Bajo	H4 11E-4 A 10 E-2
5 20-0 Muy baja	5 25-0 Muy bajo	5 Completamente meteo.	5 >20 Roca fragmentada	5 Muy bajo	H5 11E-2 A 1E-0



CONSORCIO GERENCIA MAZAR				PROYECTO HIDROELÉCTRICO MAZAR				HOJA: 3 DE: 10						
REGISTRO DE PERFORACIÓN				SONDEO: PE - 8		UBICACIÓN: DESLIZAMIENTO ERMITA SUR		INCLINACIÓN R.H.: 90°						
COORDENADAS: N: 9712.716,278 COTA (msnm): 2311,132 ORIENTACIÓN: INCLINACIÓN R.H.: 90°				E: 764.861,303 PROFUNDIDAD (m): 100,00										
FECHA INICIO: 31-mar-07 DIÁMETRO SONDEO (mm): 96,00 DE: 0,00 A: 39,50 DIÁMETRO REVESTIMIENTO(mm): 114,3 x 101,6 DE 0,0 a 39,5 m				FECHA FINAL: 03-may-07 DIÁMETRO SONDEO (mm): 75,70 DE: 39,50 A: 100,00 DIÁMETRO REVESTIMIENTO(mm): 88,9 x 80,9 DE 0,0 a 100,0 m										
JEFE DE CAMPO: Ing. M. Heredia DIÁMETRO NÚCLEO (mm): 63,50 DE: 0,00 A: 39,50 DIÁMETRO REVESTIMIENTO(mm):				FISCALIZADOR: Ing. B. Vásconez DIÁMETRO NÚCLEO (mm): 47,60 DE: 39,50 A: 100,00 DIÁMETRO REVESTIMIENTO(mm):										
PROFUNDIDAD (m)	COTA (msnm)	NIVEL AGUA (m)	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	RECUPERACIÓN	R.Q.D.	METEORIZACIÓN	FRACTURAMIENTO	CONDUCTIVIDAD	HIDRAULICA (h)	FLUJO DE RETORNO	CAJA N°	REVESTIMIENTO	INSTRUMENTACIÓN
20,00	2.291,3													
21,0	2.290,3													
22,0	2.289,3													
23,0	2.288,3													
24,0	2.287,3													
25,0	2.286,3													
26,0	2.285,3													
27,0	2.284,3													
28,0	2.283,3													
29,0	2.282,3													
30,0	2.281,3													
				21,15 m.										
				25,50 m.										
				ESQUISTO CUAZO - MICÁCEO.- De color gris verdoso, muy duro, ligeramente meteorizado, muy fracturado, fracturas inclinadas 70° / V, y contienen óxidos y limo. Se destaca un alto contenido de clorita y epidota en forma de manchas impregnadas en la muestra y la presencia de sulfuros (pirita y calcopirita), especialmente en los planos de fractura.										
				ESQUISTO CUARZO - MICÁCEO.- En partes gris verdoso y en otras marrón, coloración que toma la roca debido al alto grado de oxidación; de alta a medianamente meteorizado, fracturado, las fracturas contienen óxidos de color café y también limo.										
				La roca en muchos tramos se encuentra fragmentada, se observa que los tramos que han resistido la oxidación y meteorización, contienen vetillas y manchas de cuarzo, así como también sulfuros (pirita y calcopirita) diseminadas en la muestra.										
				COLOCACION DE TUBERIA DEL INCLINOMETRO DE 0,00 A 100,00 m.										
				114,30 X 101,60										
				4										
				5										

RECUPERACIÓN (%)		R.Q.D. (%)		METEORIZACIÓN		FRACTURAMIENTO (f/m)		FLUJO DE RETORNO (%)		CONDUCT. HIDRAULICA (cm/sig)	
1	100-81	1	100-91	1	Roca fresca	1	<2 Roca maciza	1	Muy alto	H1	<10 E-7
2	80-61	2	90-76	2	Ligeramente meteo.	2	2-5 Roca fracturada	2	Alto	H2	11E-7 A 10 E-5
3	60-41	3	75-51	3	Medianamente meteo.	3	6-10 Roca muy fracturada	3	Medio	H3	11E-5 A 10 E-4
4	40-21	4	50-26	4	Altamente meteo.	4	11-20 Extremadamente frac.	4	Bajo	H4	11E-4 A 10 E-2
5	20-0	5	25-0	5	Completamente meteo.	5	>20 Roca fragmentada	5	Muy bajo	H5	11E-2 A 1E-0



CONSORCIO GERENCIA MAZAR				PROYECTO HIDROELÉCTRICO MAZAR				MIOGECO						
REGISTRO DE PERFORACIÓN				SONDEO: PE - 8	UBICACIÓN: DESLIZAMIENTO ERMITA SUR			HOJA: 4 DE: 10						
COORDENADAS: N: 9712.716,278 COTA (msnm): 2311,132 ORIENTACIÓN: INCLINACIÓN R.H.: 90°														
E: 764.861,303 PROFUNDIDAD (m): 100,00														
FECHA INICIO: 31-mar-07 DIÁMETRO SONDEO (mm): 96,00 DE: 0,00 A: 39,50 DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm): 14,3 x 101,6 DE 0,0 a 39,5 m														
FECHA FINAL: 03-may-07 DIÁMETRO SONDEO (mm): 75,70 DE: 39,50 A: 100,00 DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm): 88,9 x 80,9 DE 0,0 a 100,0 m														
JEFE DE CAMPO: Ing. M. Heredia DIÁMETRO NÚCLEO (mm): 63,50 DE: 0,00 A: 39,50 DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm):														
FISCALIZADOR: Ing. B. Vásconez DIÁMETRO NÚCLEO (mm): 47,60 DE: 39,50 A: 100,00 DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm):														
PROFUNDIDAD (m)	COTA (msnm)	NIVEL AGUA (m)	FECHA	REGISTRO GEOLÓGICO		RECUPERACIÓN	R.Q.D.	METEORIZACIÓN	FRACTURAMIENTO	CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA (H)	FLUJO DE RETORNO	CAJA Nº	REVESTIMIENTO	INSTRUMENTACIÓN
30,00	2.281,13													
31,0	2.280,13													
32,0	2.279,13													
33,0	2.278,13													
34,0	2.277,13	33,90 m 08 - abr												
35,0	2.276,13													
36,0	2.275,13													
37,0	2.274,13	36,38 m 27 - abr												
38,0	2.273,13													
39,0	2.272,13													
40,0	2.271,13													
<p>ESQUISTO MICÁCEO.- De color marrón grisáceo, de mediana a altamente meteorizado, muy fracturado y fragmentado, con óxidos de hierro. Presencia de vetillas de cuarzo en los fragmentos mas duros, además se destaca la ocurrencia de sulfuros (pirita).</p>														
33,00 m.														
40,00 m.														
COLOCACION DE TUBERIA DEL INCLINOMETRO DE 0,00 A 100,00 m.														

RECUPERACION (%)			RQD (%)			METEORIZACION			FRACTURAMIENTO (f/m)			FLUJO RETORNO (%)			CONDUCT. HIDRAULICA (cm/seg)		
1	100-81	Excelente	1	100-91	Excelente	1	Roca fresca	1	<2 Roca maciza	1	Muy alto	H1	<10 E-7				
2	80-61	Buena	2	90-76	Bueno	2	Ligeramente meteo.	2	2-5 Roca fracturada	2	Alto	H2	11E-7 A 10 E-5				
3	60-41	Regular	3	75-51	Regular	3	Mediamente meteo.	3	6-10 Roca muy fracturada	3	Medio	H3	11E-5 A 10 E-4				
4	40-21	Baja	4	50-26	Bajo	4	Altamente meteo.	4	11-20 Extremadamente frac.	4	Bajo	H4	11E-4 A 10 E-2				
5	20-0	Muy baja	5	25-0	Muy bajo	5	Completamente meteo.	5	>20 Roca fragmentada	5	Muy bajo	H5	11E-2 A 1E-0				



CONSORCIO GERENCIA MAZAR				PROYECTO HIDROELÉCTRICO MAZAR				HIDROECONOMIA							
REGISTRO DE PERFORACIÓN				SONDEO: PE - 8		UBICACIÓN: DESLIZAMIENTO ERMITA SUR		HOJA: 5 DE: 10							
COORDENADAS: N: 9712.716,278 COTA (msnm): 2311,132 ORIENTACIÓN: INCLINACIÓN R.H.: 90°				E: 764.861,303 PROFUNDIDAD (m): 100,00											
FECHA INICIO: 31-mar-07 DIÁMETRO SONDEO (mm): 96,00 DE: 0,00 A: 39,50 DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm): 114,3 x 101,6 DE 0,0 a 39,5 m				FECHA FINAL: 03-may-07 DIÁMETRO SONDEO (mm): 75,70 DE: 39,50 A: 100,00 DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm): 88,9 x 80,9 DE 0,0 a 100,0 m											
JEFE DE CAMPO: Ing. M. Heredia DIÁMETRO NÚCLEO (mm): 63,50 DE: 0,00 A: 39,50 DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm):				FISCALIZADOR: Ing. B. Vásquez DIÁMETRO NÚCLEO (mm): 47,60 DE: 39,50 A: 100,00 DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm):											
PROFUNDIDAD (m)	COTA (msnm)	NIVEL AGUA (m)	FECHA	REGISTRO GEOLÓGICO		RECUPERACIÓN	R.Q.D.	METEORIZACIÓN	FRACTURAMIENTO	CONDUCTIVIDAD	HIDRÁULICA (H)	FLUJO DE RETORNO	CALA Nº	REVESTIMIENTO	INSTRUMENTACIÓN
				SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN										
40,00	2271,3														
41,0	2270,3														
42,0	2269,3														
43,0	2268,3														
43,65 m	2267,3		29 - abr												
44,0	2267,3														
44,55 m	2266,3		04 - may												
45,0	2266,3														
46,0	2265,3														
46,50 m	2264,3		03 - may												
47,0	2264,3														
48,0	2263,3														
49,0	2262,3														
50,0	2261,3														

ESQUISTO CUARZO - CLORÍTICO.- De color verde, de mediana a altamente meteorizado, en ciertos tramos extremadamente fracturado y fragmentado, con planos de fractura oxidados y con esporádica presencia de limo.

Algunas fracturas son paralelas a la esquistocidad (50° - 60°) y otras transversales a la misma.

Presencia de bandeamientos milimétricos de cuarzo y clorita, paralelos a la esquistocidad.

7

8

9

COLOCACION DE TUBERIA DEL INCLINOMETRO DE 0,00 A 100,00 m.

RECUPERACION (%)			RQD (%)			METEORIZACION			FRACTURAMIENTO (f./m)			FLUJO RETORNO (%)			CONDUC. HIDRAULICA (cm/seg)		
1	100-81	Excelente	1	100-91	Excelente	1	Roca fresca	1	<2 Roca maciza	1	Muy alto	H1	<10 E-7				
2	80-61	Buena	2	90-76	Buena	2	Ugeramente meteo.	2	2-5 Roca fracturada	2	Alto	H2	11E-7 A 10 E-5				
3	60-41	Regular	3	75-51	Regular	3	Medianamente meteo.	3	6-10 Roca muy fracturada	3	Medio	H3	11E-5 A 10 E-4				
4	40-21	Baja	4	50-26	Bajo	4	Altamente meteo.	4	11-20 Extremadamente frac.	4	Bajo	H4	11E-4 A 10 E-2				
5	20-0	Muy baja	5	25-0	Muy bajo	5	Completamente meteo.	5	>20 Roca fragmentada	5	Muy bajo	H5	11E-2 A 1E-0				



CONSORCIO GERENCIA MAZAR				PROYECTO HIDROELÉCTRICO MAZAR				HIGGECO							
REGISTRO DE PERFORACIÓN				SONDEO: PE-8		UBICACIÓN: DESLIZAMIENTO ERMITA SUR		HOJA: 6 DE: 10							
COORDENADAS: N: 9712.716,278 COTA (msnm): 2311,132 ORIENTACIÓN: INCLINACIÓN R.H.: 90°				PROFUNDIDAD (m): 100,00											
E: 764.861,303															
FECHA INICIO: 31-mar-07 DIÁMETRO SONDEO (mm): 96,00 DE: 0,00 A: 39,50 DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm): 114,3 x 101,6 DE 0,0 a 39,5 m															
FECHA FINAL: 03-may-07 DIÁMETRO SONDEO (mm): 75,70 DE: 39,50 A: 100,00 DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm): 88,9 x 80,9 DE 0,0 a 100,0 m															
JEFE DE CAMPO: Ing. M. Heredia DIÁMETRO NÚCLEO (mm): 63,50 DE: 0,00 A: 39,50 DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm):															
FISCALIZADOR: Ing. B. Vásconez DIÁMETRO NÚCLEO (mm): 47,60 DE: 39,50 A: 100,00 DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm):															
PROFUNDIDAD (m)	COTA (msnm)	NIVEL AGUA (m)	FECHA	REGISTRO GEOLÓGICO		RECUPERACIÓN	R.Q.D.	METEORIZACIÓN	FRAC- TURA- MIENTO	CONDUCTIVIDAD	HIDRÁULICA (H)	FLUJO DE RETORNO	CAJA Nº	REVESTIMIENTO	INSTRUMENTACIÓN
50,00	2.261,13														
51,0	2.260,13														
52,0	2.259,13														
53,0	2.258,13														
54,0	2.257,13														
55,0	2.256,13														
56,0	2.255,13														
57,0	2.254,13														
58,0	2.253,13														
59,0	2.252,13														
60,0	2.251,13														
				53,20 m.											
				ESQUISTO CUARZO - CLORÍTICO.- De color verde, medianamente meteorizado, con ciertos tramos donde la meteorización es ligera, extremadamente fracturado a muy fracturado. Las fracturas son generalmente transversales a la esquistocidad y con formas escalonadas, rugosas y lisas, las mismas que contienen óxidos de color café.											
				Presencia de bandeamientos milimétricos de cuarzo y clorita, paralelos a la foliación, la misma que tiene aproximadamente de 40° a 60°.											
COLOCACION DE TUBERIA DEL INCLINOMETRO DE 0,00 A 100,00 m.															

RECUPERACIÓN (%)			RQD (%)			METEORIZACIÓN			FRAC- TURAMIENTO (l/m)			FLUJO RETORNO (%)			CONDUCT. HIDRÁULICA (cm/seg)		
1	100-81	Excelente	1	100-91	Excelente	1	Roca fresca	1	<2 Roca maciza	1	Muy alto	H1	<10 E-7				
2	80-61	Buena	2	90-76	Buena	2	Ligeramente meteo.	2	2-5 Roca fracturada	2	Alto	H2	11E-7 A 10 E-5				
3	60-41	Regular	3	75-51	Regular	3	Medianamente meteo.	3	6-10 Roca muy fracturada	3	Medio	H3	11E-5 A 10 E-4				
4	40-21	Baja	4	50-26	Baja	4	Altamente meteo.	4	11-20 Extremadamente frac.	4	Bajo	H4	11E-4 A 10 E-2				
5	20-0	Muy baja	5	25-0	Muy baja	5	Completamente meteo.	5	>20 Roca fragmentada	5	Muy bajo	H5	11E-2 A 1E-0				



CONSORCIO GERENCIA MAZAR			PROYECTO HIDROELÉCTRICO MAZAR			HIGGECO											
REGISTRO DE PERFORACIÓN			SONDEO: PE - 8			UBICACIÓN: DESLIZAMIENTO ERMITA SUR			HOJA: 7 DE: 10								
COORDENADAS: N: 9712.716,278			COTA (msnm): 2311,132			ORIENTACIÓN: INCLINACIÓN R.H.: 90°											
E: 764.861,303			PROFUNDIDAD (m): 100,00														
FECHA INICIO: 31-mar-07			DIÁMETRO SONDEO (mm): 96,00			DE: 0,00 A: 39,50			DIÁMETRO REVESTIMIENTO(mm): 114,3 x 101,6 DE 0,0 a 39,5 m								
FECHA FINAL: 03-may-07			DIÁMETRO SONDEO (mm): 75,70			DE: 39,50 A: 100,00			DIÁMETRO REVESTIMIENTO(mm): 88,9 x 80,9 DE 0,0 a 100,0 m								
JEFE DE CAMPO: Ing. M. Heredia			DIÁMETRO NÚCLEO (mm): 63,50			DE: 0,00 A: 39,50			DIÁMETRO REVESTIMIENTO(mm):								
FISCALIZADOR: Ing. B. Vásquez			DIÁMETRO NÚCLEO (mm): 47,60			DE: 39,50 A: 100,00			DIÁMETRO REVESTIMIENTO(mm):								
PROFUNDIDAD (m)	COTA (msnm)	NIVEL AGUA (m)	FECHA	SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	RECUPERACIÓN	R.Q.D.	METEORIZACIÓN	FRACTURAMIENTO	CONDUCTIVIDAD	HIDRAULICA (H)	FLUJO DE RETORNO	CAJA Nº	REVESTIMIENTO	INSTRUMENTACIÓN		
60,00	2.251,13																
61,0	2.250,13																
62,0	2.249,13																
63,0	2.248,13																
64,0	2.247,13																
65,0	2.246,13																
66,0	2.245,13																
67,0	2.244,13																
68,0	2.243,13																
69,0	2.242,13																
70,0	2.241,13																
					CUARCITAS Y CUARCITAS ESQUISTOSAS.- De color gris ligeramente meteorizadas hasta los 62,00 m y luego medianamente meteorizadas. La roca está en ciertos tramos extremadamente fracturada a fragmentada, con ligera esquistocidad.												
					Las fracturas son inclinadas (45° - 60°), escalonadas, lisas y rugosas, mismas que contienen óxidos de hierro, se destacan bandeamientos milimétricos y manchas de cuarzo con un bajo contenido de clorita.												
LEYENDA																	
RECUPERACIÓN (%)			RQD (%)			METEORIZACIÓN			FRACTURAMIENTO (f/m)			FLUJO RETORNO (%)			CONDUCT. HIDRAULICA (cm/seg)		
1	100-81	Excelente	1	100-91	Excelente	1	Roca fresca	1	<2 Roca maciza	1	Muy alto	H1	<10 E-7				
2	80-61	Buena	2	90-76	Buena	2	Ligeramente meteo.	2	2-5 Roca fracturada	2	Alto	H2	11E-7 A 10 E-5				
3	60-41	Regular	3	75-51	Regular	3	Medianamente meteo.	3	6-10 Roca muy fracturada	3	Medio	H3	11E-5 A 10 E-4				
4	40-21	Baja	4	50-26	Baja	4	Altamente meteo.	4	11-20 Extremadamente frac.	4	Bajo	H4	11E-4 A 10 E-2				
5	20-0	Muy baja	5	25-0	Muy baja	5	Completamente meteo.	5	>20 Roca fragmentada	5	Muy bajo	H5	11E-2 A 1E-0				

165



CONSORCIO GERENCIA MAZAR				PROYECTO HIDROELÉCTRICO MAZAR				HIGGBO							
REGISTRO DE PERFORACIÓN				SONDEO: PE - 8		UBICACIÓN: DESLIZAMIENTO ERMITA SUR		HOJA: 9 DE: 10							
COORDENADAS: N: 9712.716,278 COTA (msnm): 2311,132 ORIENTACIÓN: INCLINACIÓN R.H.: 90°				E: 764.861,303 PROFUNDIDAD (m): 100,00											
FECHA INICIO: 31-mar-07 DIÁMETRO SONDEO (mm): 96,00 DE: 0,00 A: 39,50 DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm): 114,3 x 1016 DE 0,0 a 39,5 m				FECHA FINAL: 03-may-07 DIÁMETRO SONDEO (mm): 75,70 DE: 39,50 A: 100,00 DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm): 88,9 x 80,9 DE 0,0 a 100,0 m											
JEFE DE CAMPO: Ing. M. Heredia DIÁMETRO NÚCLEO (mm): 63,50 DE: 0,00 A: 39,50 DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm):				FISCALIZADOR: Ing. B. Vásconez DIÁMETRO NÚCLEO (mm): 47,60 DE: 39,50 A: 100,00 DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm):											
PROFUNDIDAD (m)	COTA (msnm)	NIVEL AGUA (m)	FECHA	REGISTRO GEOLÓGICO		RECUPERACIÓN	R.Q.D.	METEORIZACIÓN	FRAC-TURA-MIENTO	CONDUCTIVIDAD	HIDRÁULICA (H)	FLUJO DE RETORNO	CAJA Nº	REVESTIMIENTO	INSTRUMENTACIÓN
80,00	2.231,13														
81,0	2.230,13														
82,0	2.229,13			82,00 m.									14		
83,0	2.228,13			ESQUISTO CUARZO - CLORÍTICO.- De color verdoso, medianamente meteorizado en ciertos tramos, extremadamente fracturado a fragmentado, las fracturas son inclinadas, paralelas a la foliación existente, contienen óxidos de color café y esporádicas partículas de CaCO ₃ . Se presentan manchas y microvetillas de clorita y cuarzo.											
84,0	2.227,13														
85,0	2.226,13			85,20 m.											
86,0	2.225,13														
87,0	2.224,13			CUARCITAS MASIVAS Y ESQUISTOSAS.- De color gris, de mediana a ligeramente meteorizadas, muy fracturadas, con fracturas subhorizontales, con formas escalonadas, planas y rugosas, las mismas que contienen óxidos y esporádicas partículas de CaCO ₃ .									15		
88,0	2.223,13			La foliación es vertical, la roca presenta microvetillas de cuarzo y esporádica clorita, muy dura y resistente.											
89,0	2.222,13														
90,0	2.221,13														

LEYENDA

RECUPERACIÓN (%)	RQD (%)	METEORIZACIÓN	FRAC-TURA-MIENTO (l/m)	FLUJO RETORNO (%)	CONDUCT. HIDRÁULICA (cm/seg)
1 100-81 Excelente	1 100-91 Excelente	1 Roca fresca	1 <2 Roca maciza	1 Muy alto	H1 <10 E-7
2 80-61 Buena	2 90-76 Bueno	2 Ligeramente meteo.	2 2-5 Roca fracturada	2 Alto	H2 11E-7 A 10 E-5
3 60-41 Regular	3 75-51 Regular	3 Medianamente meteo.	3 6-10 Roca muy fracturada	3 Medio	H3 11E-5 A 10 E-4
4 40-21 Baja	4 50-26 Bajo	4 Altamente meteo.	4 11-20 Extremadamente frac.	4 Bajo	H4 11E-4 A 10 E-2
5 20-0 Muy baja	5 25-0 Muy bajo	5 Completamente meteo.	5 >20 Roca fragmentada	5 Muy bajo	H5 11E-2 A 1E-0



CONSORCIO GERENCIA MAZAR			PROYECTO HIDROELÉCTRICO MAZAR			HIGBOCO											
REGISTRO DE PERFORACIÓN			SONDEO: PE - 8	UBICACIÓN: DESLIZAMIENTO ERMITA SUR		HOJA: 10 DE: 10											
COORDENADAS: N: 9712.716,278 COTA (msnm): 2311,132			ORIENTACIÓN:		INCLINACIÓN R.H.: 90°												
E: 764.861,303 PROFUNDIDAD (m): 100,00																	
FECHA INICIO: 31-mar-07 DIÁMETRO SONDEO (mm): 96,00			DE: 0,00	A: 39,50	DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm): 114,3 x 1016 DE 0,0 a 39,5 m												
FECHA FINAL: 03-may-07 DIÁMETRO SONDEO (mm): 75,70			DE: 39,50	A: 100,00	DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm): 88,9 x 80,9 DE 0,0 a 100,0 m												
JEFE DE CAMPO: Ing. M. Heredia DIÁMETRO NÚCLEO (mm): 63,50			DE: 0,00	A: 39,50	DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm):												
FISCALIZADOR: Ing. B. Vásquez DIÁMETRO NÚCLEO (mm): 47,60			DE: 39,50	A: 100,00	DIÁMETRO REVESTIMIENTO (mm):												
PROFUNDIDAD (m)	COTA (msnm)	NIVEL AGUA (m)	REGISTRO GEOLÓGICO		RECUPERACIÓN	R.Q.D.	METEORIZACIÓN	FRACTURAMIENTO	CONDUCTIVIDAD	HIDRAULICA (H)	FLUJO DE RETORNO	CAJA Nº	REVESTIMIENTO	INSTRUMENTACIÓN			
FECHA	SIMBOLOGIA	DESCRIPCIÓN															
90,00	2221,3																
91,0	2220,3		91,20 m.														
92,0	2219,3																
93,0	2218,3																
94,0	2217,3		CUARCITAS MASIVAS Y ESQUISTOSAS.- De color gris, la roca es sana, con muy esporádicas fracturas naturales, las existentes son mecánicas.														
95,0	2216,3		La ligera esquistocidad que presenta la roca es vertical y tiene vetillas y microvetillas de cuarzo, los planos de fractura presentan algo de óxidos y partículas milimétricas de CaCO ₃ .														
96,0	2215,3		La roca es muy dura y resistente. Se destaca también, la presencia esporádica de mineralización de sulfuros (pirita), especialmente en los planos de fractura.														
97,0	2214,3																
98,0	2213,3																
99,0	2212,3																
100,0	2211,3		FIN DEL SONDEO 100,00 m.														
LEYENDA																	
RECUPERACIÓN (%)			RQD (%)			METEORIZACIÓN			FRACTURAMIENTO (f/m)			FLUJO RETORNO (%)			CONDUCT. HIDRAULICA (cm/seg)		
1	100-81	Excelente	1	100-91	Excelente	1	Roca fresca	1	<2 Roca maciza	1	Muy alto	H1	<1.0	E-7			
2	80-61	Buena	2	90-76	Buena	2	Ligeramente meteo.	2	2-5 Roca fracturada	2	Alto	H2	1.1E-7	A 1.0 E-5			
3	60-41	Regular	3	75-51	Regular	3	Medianamente meteo.	3	6-10 Roca muy fracturada	3	Medio	H3	1.1E-5	A 1.0 E-4			
4	40-21	Baja	4	50-26	Bajo	4	Altamente meteo.	4	11-20 Extremadamente frac.	4	Bajo	H4	1.1E-4	A 1.0 E-3			
5	20-0	Muy baja	5	25-0	Muy bajo	5	Completamente meteo.	5	>20 Roca fragmentada	5	Muy bajo	H5	1.1E-2	A 1.0 E-2			



ANEXO 9:

VARIACIONES DEL NIVEL FREÁTICO REGISTRADO EN LA PERFORACIONES, TABLA 4.



UBICACIÓN	PROFUNDIDAD (m)			OBSERVACIONES
	MÁXIMA	MÍNIMA	DIFERENCIA	
P-E1	40,18	32,59	7,59	Piezómetro Casagrande
P-E2	95,41	90,34	5,07	Lecturas en el interior del tubo de inclinómetro.
P-E3	85,13	71,25	13,88	Lecturas en el interior del tubo de inclinómetro, operativo hasta mayo de 2007.
PE-8	59,8	54,77	5,03	Lecturas en el interior del tubo de inclinómetro, operativo hasta mayo de 2008.
PE-10	31,2	28,68	2,52	Lecturas en el interior del tubo de inclinómetro, operativo hasta mayo de 2008.
EPZ-1-a	66,08	56,13	9,96	Piezómetros de cuerda vibrante, registran los niveles en el macizo rocoso fuera del deslizamiento.
EPZ-1-b	72,6	61,24	11,36	Piezómetros de cuerda vibrante, registran los niveles en el macizo rocoso fuera del deslizamiento.
EPZ-2	85,13	81,14	3,99	Piezómetros de cuerda vibrante.
EPZ-3	98,09	97,36	0,74	Piezómetros de cuerda vibrante.
EIN-1	63,25	62,06	1,19	Lecturas en el interior del tubo de inclinómetro, operativo hasta septiembre de 2008.
EIN-4	100	96,4	3,6	Lecturas en el interior del tubo de inclinómetro, operativo hasta julio de 2008.
EIN-5	100,5	99,87	0,63	Lecturas en el interior del tubo de inclinómetro, operativo hasta septiembre de 2008.

Tabla 4.- Variaciones del nivel freático encontradas en las perforaciones realizadas en La Ermita Sur, tabla proporcionada y adaptada de HIDROPAUTE [2].



ANEXO 10:

REGISTRO DE ACTIVIDADES EN HITOS TOPOGRÁFICOS



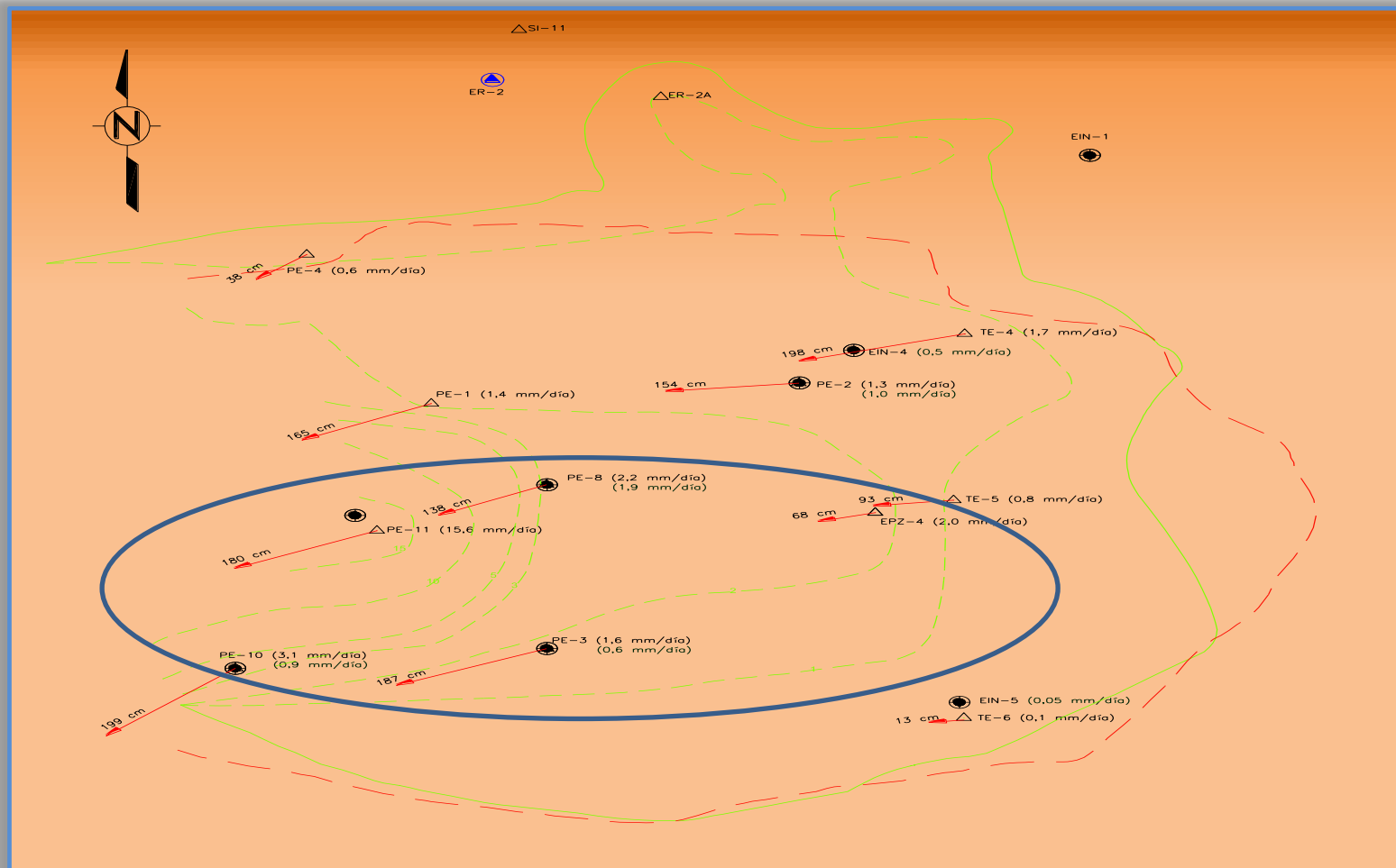
HITO	DATOS INICIALES				DATOS FINALES				DATOS TOTALES REGISTRADOS (PERIODO INICIO - FINAL)			VELOCIDAD MOVIMIENTO		
	FECHA	NORTE	ESTE	COTA m.s.n.m.	FECHA	NORTE	ESTE	COTA m.s.n.m.	DIAS TOTALES MONITOREO	DESPLAZ TOTAL PERIODO (m)	ASENT (mm)	VELOCIDAD PROMEDIO DIARIA (mm/día)	VELOCIDAD PROMEDIO ANUAL (mm/año)	AZIMUT (°)
PE-1	21/12/2005	9712755,9960	764827,9320	2305,570	22/02/2009	9712755,1864	764826,2618	2304,661	1159	1511,00	-1650,00	1,40	422,80	244
PE-2	21/12/2005	9712766,0290	764933,7250	2360,619	22/02/2009	9712765,9031	764932,4088	2359,199	1159	1083,00	-1543,00	1,30	392,20	264
PE-3	21/12/2005	9712636,0530	764861,1160	2294,458	22/02/2009	9712635,3532	764859,4317	2293,091	1159	1512,00	-1868,00	1,60	483,20	247
PE-4	30/06/2007	9712828,8600	764792,0880	2311,397	22/02/2009	9712828,7031	764791,7636	2311,114	603	327,00	-380,00	0,60	181,20	230
PE-8	15/06/2007	9712716,0710	764860,6640	2310,958	22/02/2009	9712715,5719	764859,6562	2310,295	618	1224,00	-1384,00	2,20	664,40	244
PE-10	27/05/2007	9712625,6480	764770,7920	2234,414	22/02/2009	9712625,2008	764769,8051	2233,761	637	1926,00	-1986,00	3,10	936,20	228
PE-11	30/06/2007	9712693,5590	764811,8930	2280,996	22/02/2009	9712692,9465	764810,3494	2280,082	603	1608,00	-1801,00	3,00	906,00	246
TE-4	21/12/2005	9712790,1870	764981,5070	2395,056	22/02/2009	9712789,6350	764979,7214	2393,437	1159	1521,00	-1982,00	1,70	513,40	254
TE-5	21/12/2005	9712708,7600	764978,3070	2377,049	22/02/2009	9712708,6438	764977,6989	2376,100	1159	543,00	-925,00	0,80	241,60	263
TE-6	21/12/2005	9712602,2330	764981,2680	2368,203	22/02/2009	9712602,2022	764981,2626	2368,052	1159	62,00	-129,00	0,10	30,20	263
TE-7	21/12/2005	9712482,3200	764948,2740	2356,922	22/02/2009	9712482,3334	764948,2652	2356,800	1159	10,00	-51,00	0,04	12,08	288
EPZ-4	16/03/2008	9712702,6140	764955,7480	2362,498	22/02/2009	9712705,9590	764954,4090	2362,873	819	477,00	-680,00	2,00	604,00	255
CT-1	18/04/2010	9712837,8150	764943,9470	2379,917	05/09/2012	9712837,6992	764943,6530	2379,469	871	315,96	-448,00	0,44	134,76	245
CT-2	18/04/2010	9712828,8540	764891,5490	2363,025	05/09/2012	9712828,7368	764891,1389	2362,696	871	426,56	-329,00	0,59	181,77	252
CT-3	18/04/2010	9712810,3840	764859,2050	2348,447	05/09/2012	9712810,2363	764858,7666	2348,141	871	462,57	-306,00	0,64	196,61	250
CT-4	18/04/2010	9712790,9670	764911,9290	2355,576	05/09/2012	9712790,9008	764911,5672	2355,200	871	367,80	-376,00	0,51	157,84	257
CT-5	18/04/2010	9712730,3760	764897,9130	2336,008	05/09/2012	9712730,3156	764897,4886	2335,620	871	428,63	-388,00	0,57	185,89	257
CT-6	18/04/2010	9712754,3780	765044,0500	2432,131	05/09/2012	9712754,4150	765044,0103	2432,074	871	54,26	-57,00	0,28	21,02	286
CT-7	09/05/2010	9712648,7030	765092,3150	2459,404	05/09/2012	9712648,7273	765092,2962	2459,323	850	30,76	-81,00	0,29	15,39	299
CT-8	18/04/2010	9712656,4780	764961,2070	2357,467	05/09/2012	9712656,5301	764960,9275	2357,236	871	284,31	-231,00	0,39	115,72	276
CT-9	18/04/2010	9712669,3460	764898,8780	2322,598	05/09/2012	9712669,2934	764898,4882	2322,221	871	393,29	-377,00	0,56	169,8	261
CT-10	18/04/2010	9712662,1500	764849,0990	2293,555	05/09/2012	9712662,0874	764848,6711	2293,226	871	432,42	-329,00	0,60	185,28	260

Anexo 10.- Registro de actividades de hitos topográficos colocados en la zona de estudio. Datos proporcionados por HIDROPAUTE y adaptados al presente trabajo [2].

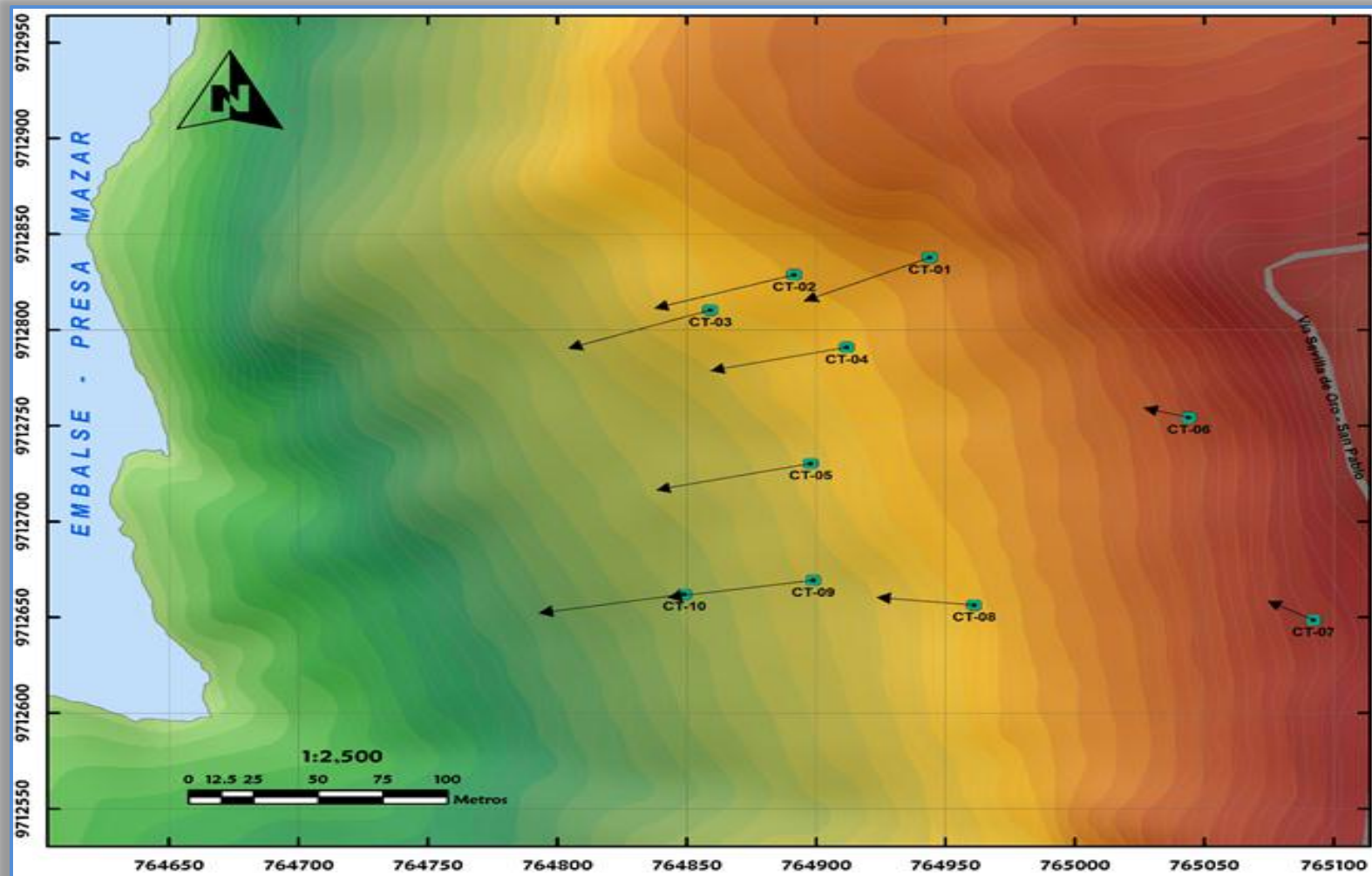


ANEXOS 11 Y 12:

MAPAS DE UBICACIÓN DE HITOS TOPOGRÁFICOS DOS GRUPOS



Anexo 11: Ubicación de hitos topográficos del primer grupo de investigación. Mapa proporcionado por HIDROPAUTE y adaptado al presente trabajo [2]. Los hitos PE – 11, PE – 10, EPZ – 4 y PE – 8 son los que registran mayor desplazamiento y su ubicación es dentro de la línea azul que a la vez representa la zona de mayor peligro.

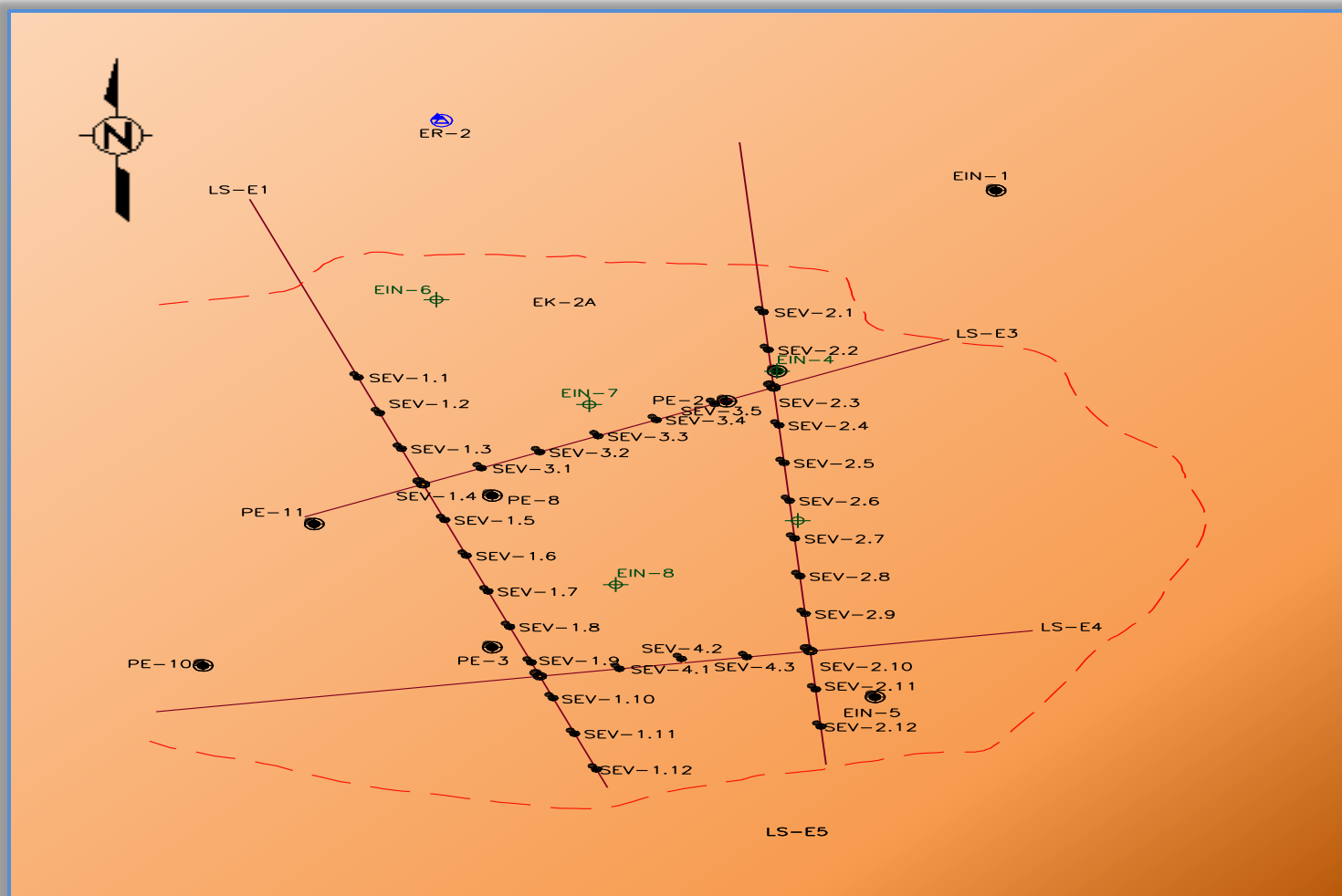


Anexo 12.- Ubicación de hitos topográficos del segundo grupo de investigación. Mapa proporcionado por HIDROPAUTE y adaptado al presente trabajo [15].



ANEXOS 13:

MAPAS DE UBICACIÓN DE INVESTIGACIÓN GEOFÍSICA REALIZADA

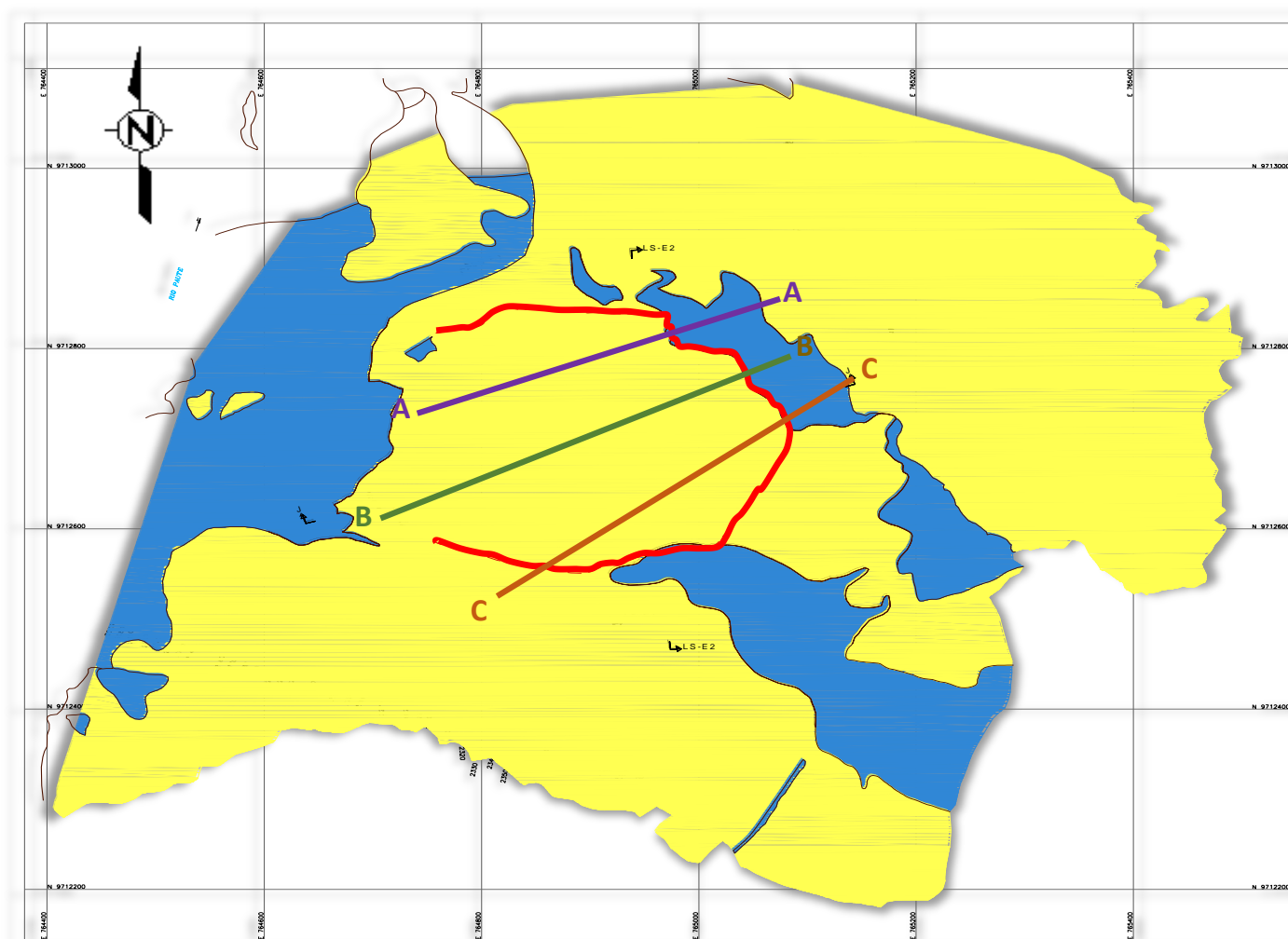


Anexo 13.- Ubicación de los ensayos de geofísica realizados en la zona. Mapa proporcionado por HIDROPAUTE y adaptado al presente trabajo [2].



ANEXOS 14:

MAPA DE UBICACIÓN DE LOS PÉRFILES REALIZADOS EN LA ZONA

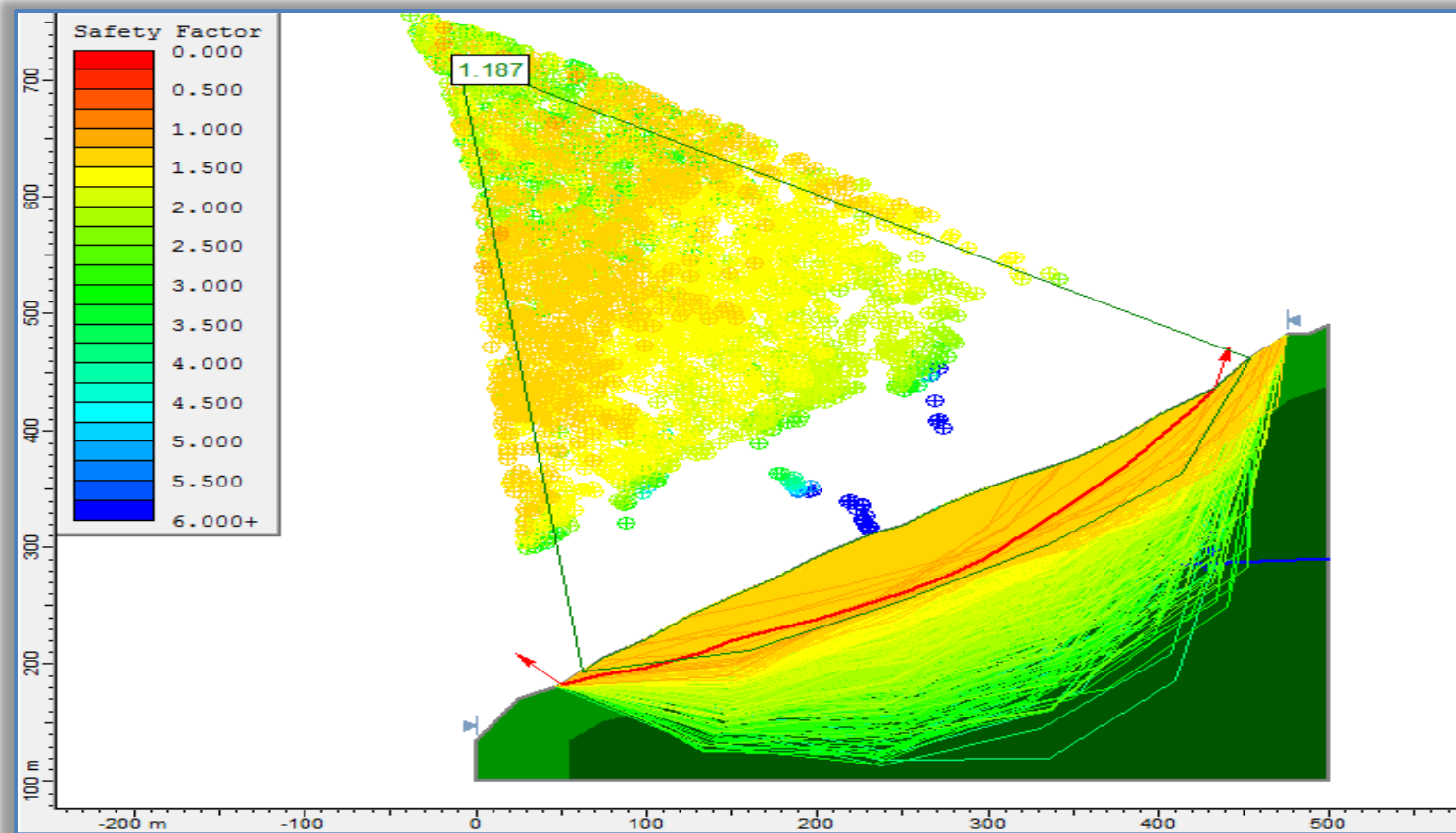


Anexo 14.- Perfiles realizados en la zona de estudio. Datos proporcionados por HIDROPAUTE y adaptados al presente trabajo [2].

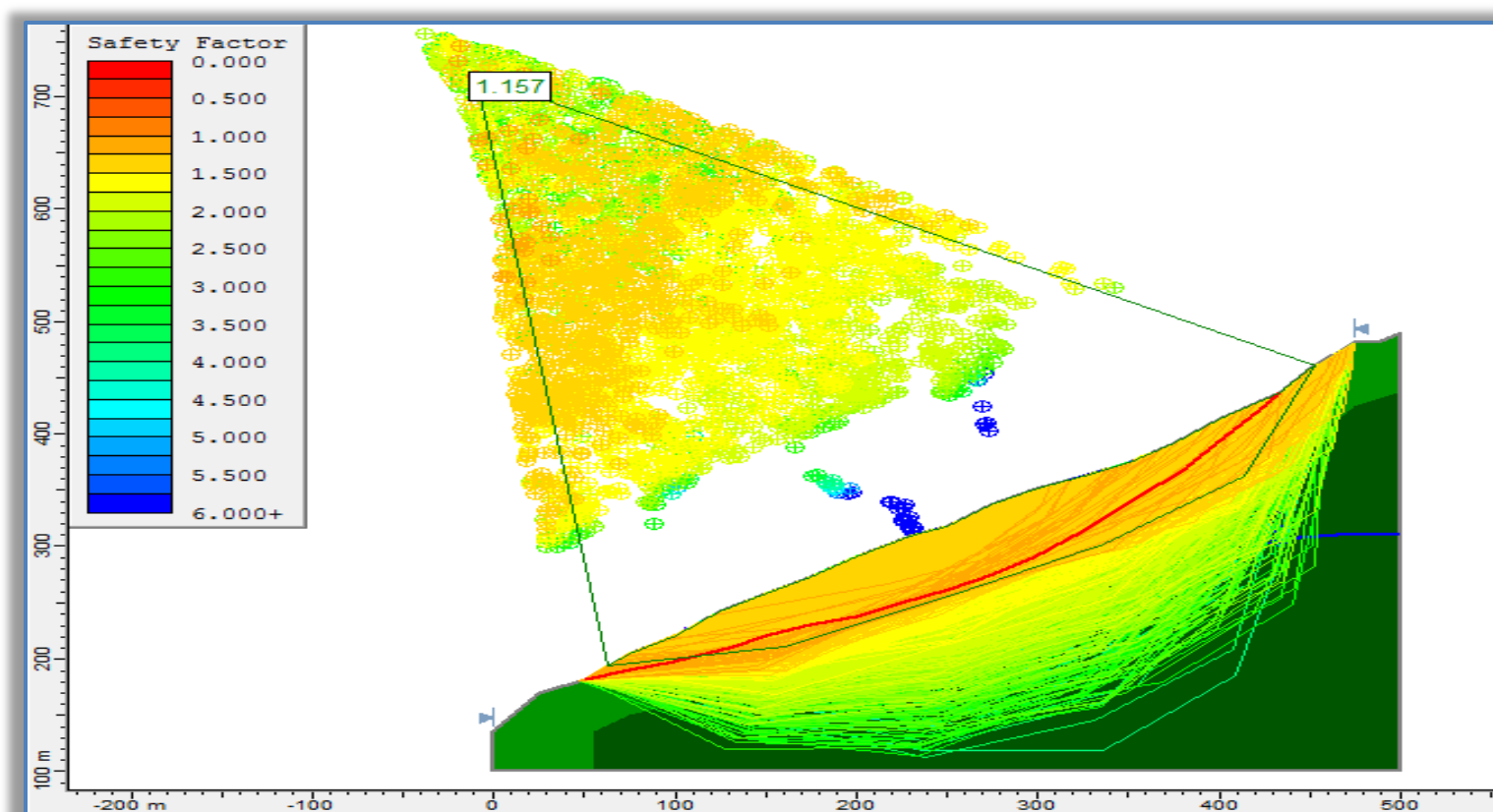


ANEXOS 15:

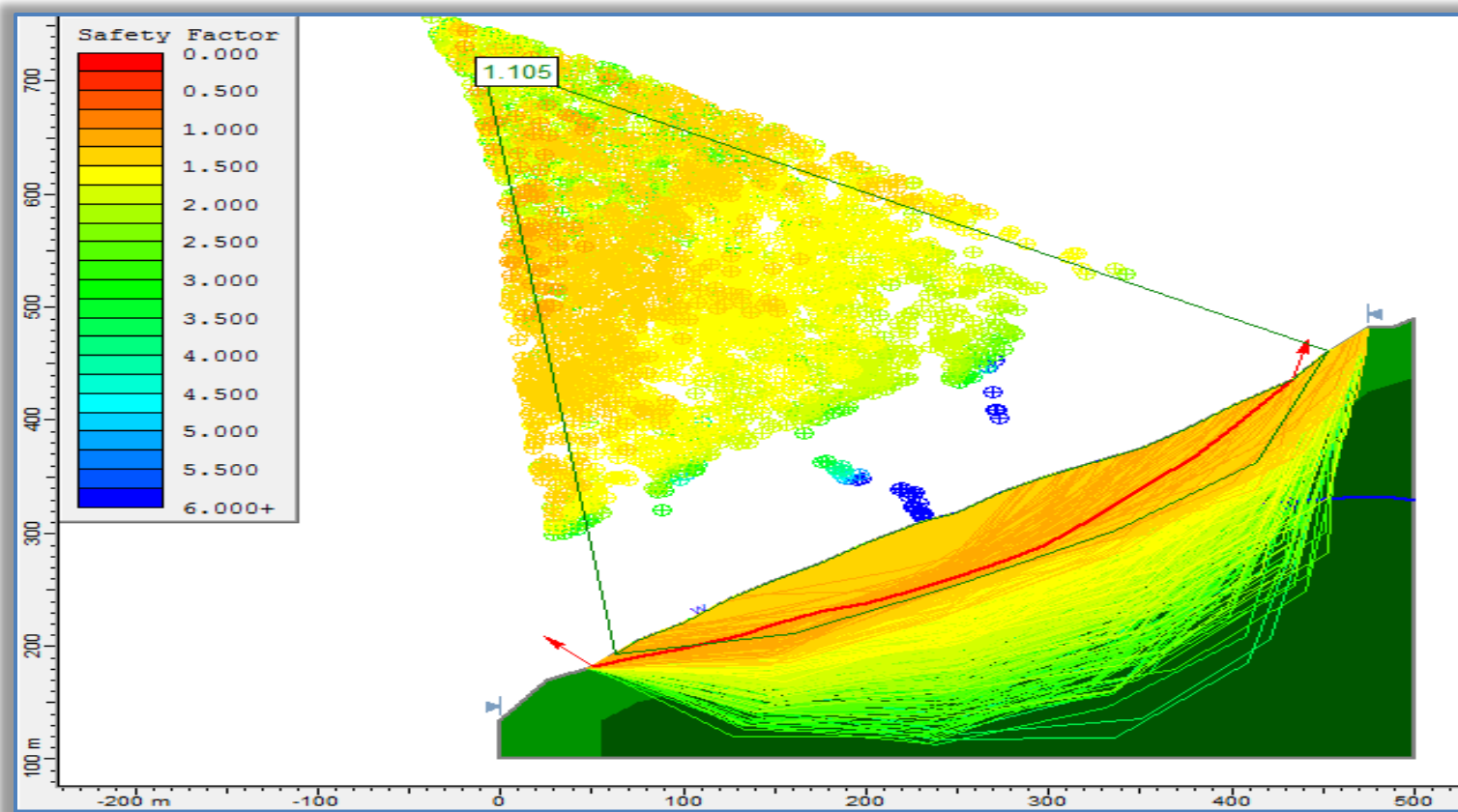
VARIACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD EN FUNCIÓN DEL NIVEL FREÁTICO UTILIZANDO EL PROGRAMA SLIDE APLICANDO MEL



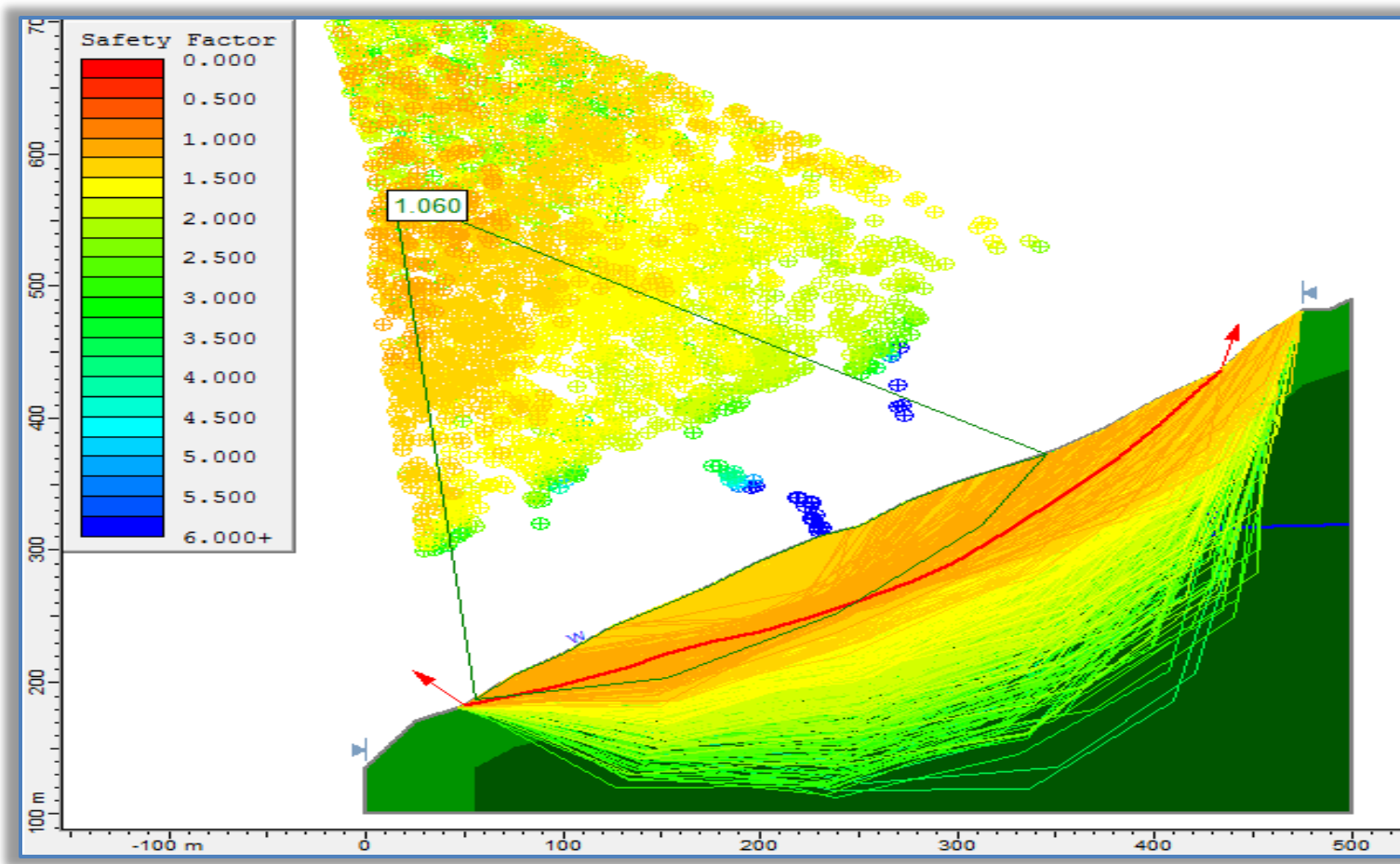
Factor de seguridad calculado para un nivel freático en condiciones originales, bajo los 62 metros de profundidad desde la superficie, en el gráfico se observa el plano de falla asumido identificado la línea roja y el calculado por el programa, los planos guardan similitud.



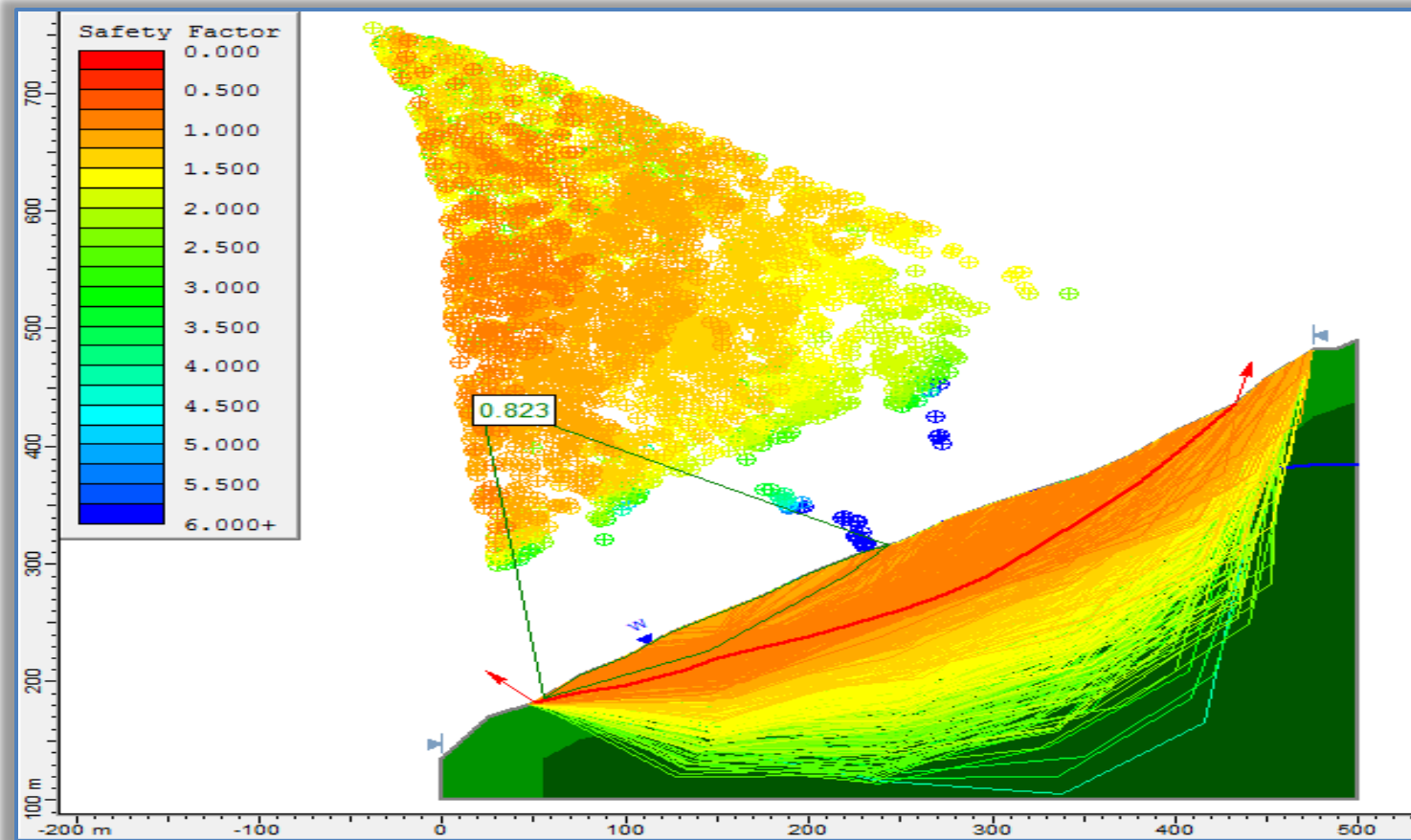
Factor de seguridad calculado para un nivel freático en condiciones probables, bajo los 50 metros de profundidad desde la superficie. Se observa el plano de falla asumido y el plano de falla calculado por el programa con el nivel freático adoptado para esta modelación.



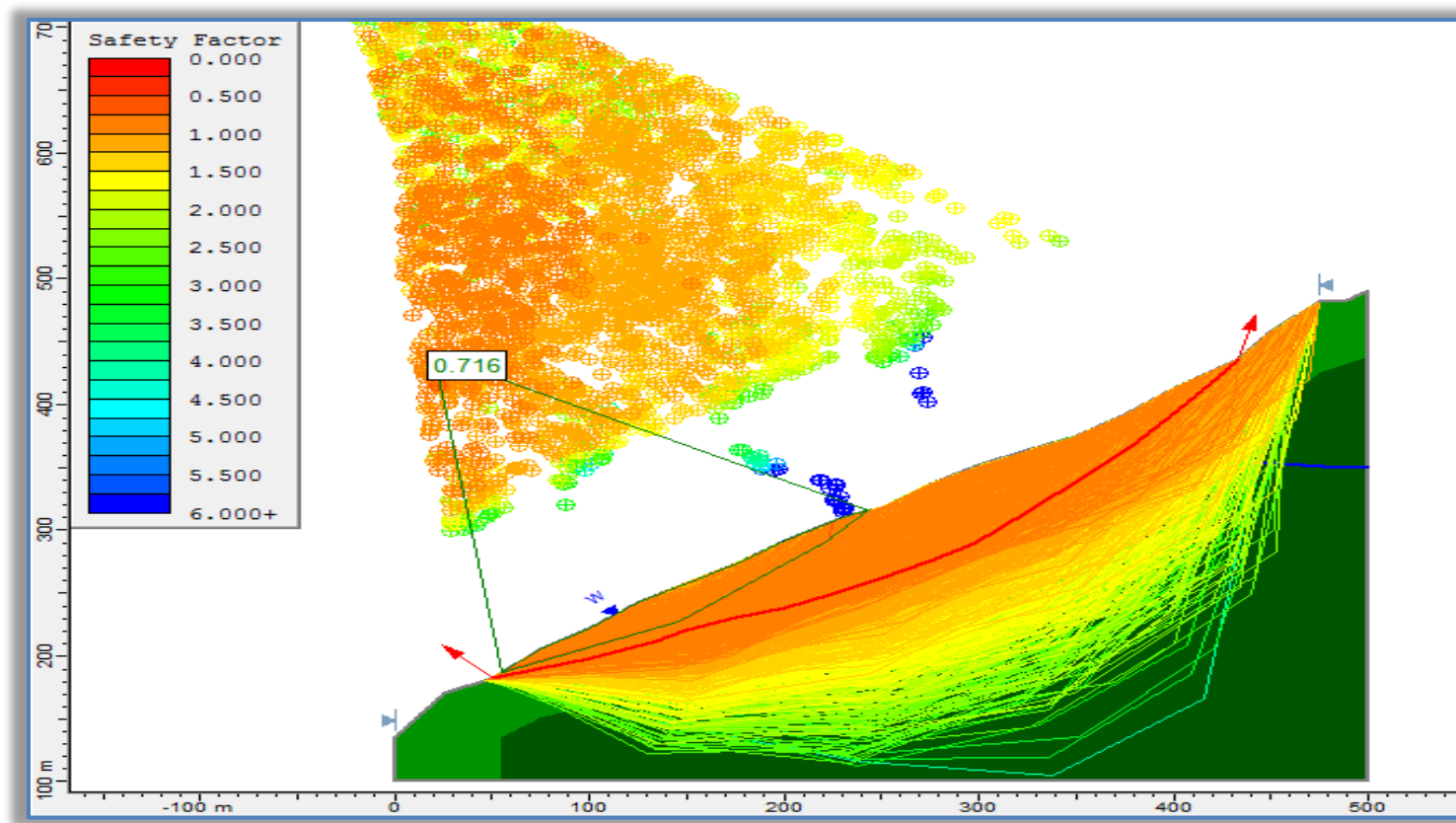
Factor de seguridad calculado para un nivel freático en condiciones probables bajo los 40 metros de profundidad desde la superficie. Se observa el plano de falla asumido y su relación con el calculado por el programa para esta condición de nivel freático.



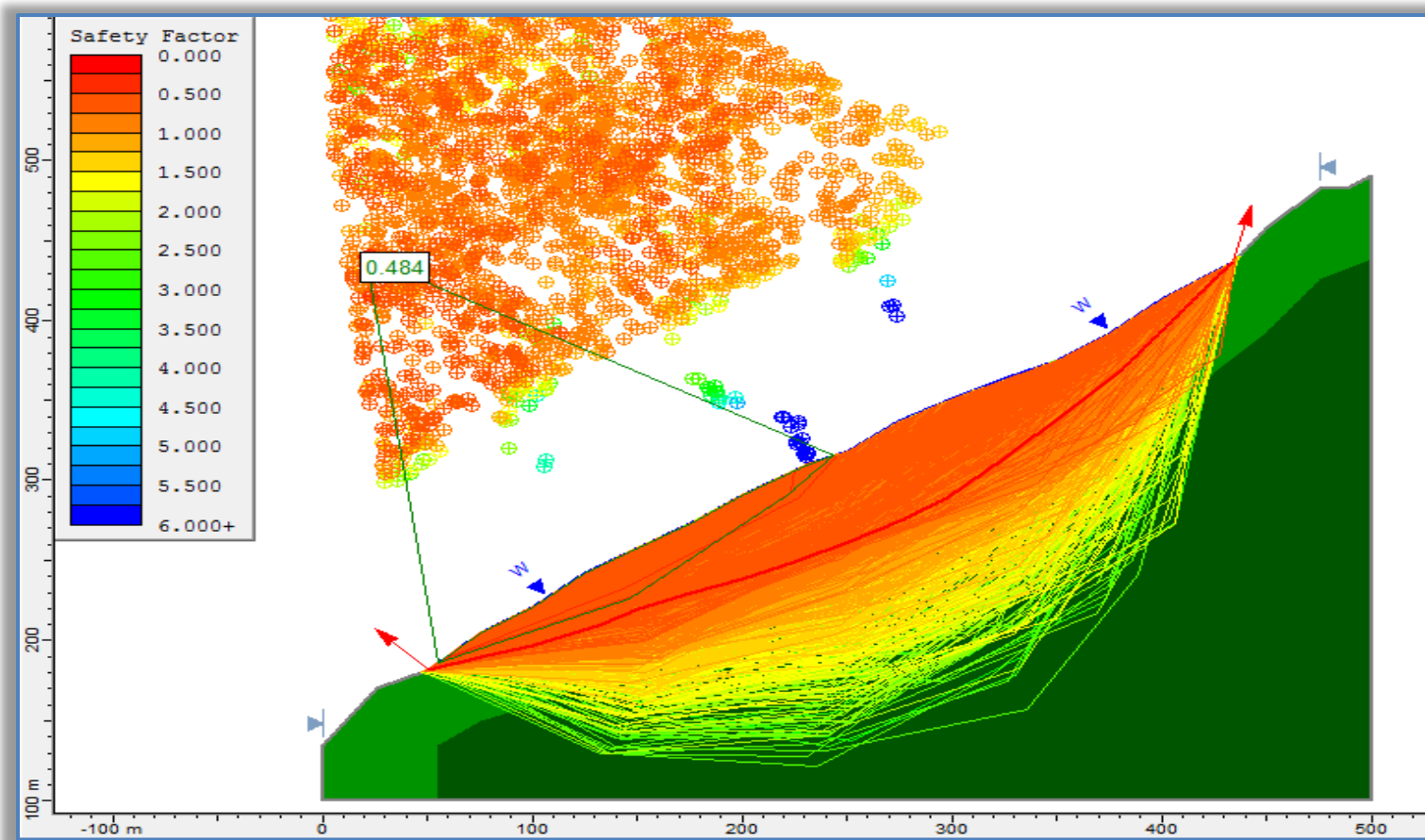
Factor de seguridad calculado para un nivel freático en condiciones probables bajo los 30 metros de profundidad desde la superficie. El FS más crítico con este nivel freático indica una superficie de falla que tiende al extremo inferior del talud.



Factor de seguridad calculado para un nivel freático en condiciones probables bajo los 20 metros de profundidad desde la superficie. El FS más crítico localizado con el programa indica un fallo en el extremo inferior del programa.



Factor de seguridad calculado para un nivel freático en condiciones probables bajo los 10 metros de profundidad desde la superficie. Se ubica la zona de falla en el extremo inferior del talud.

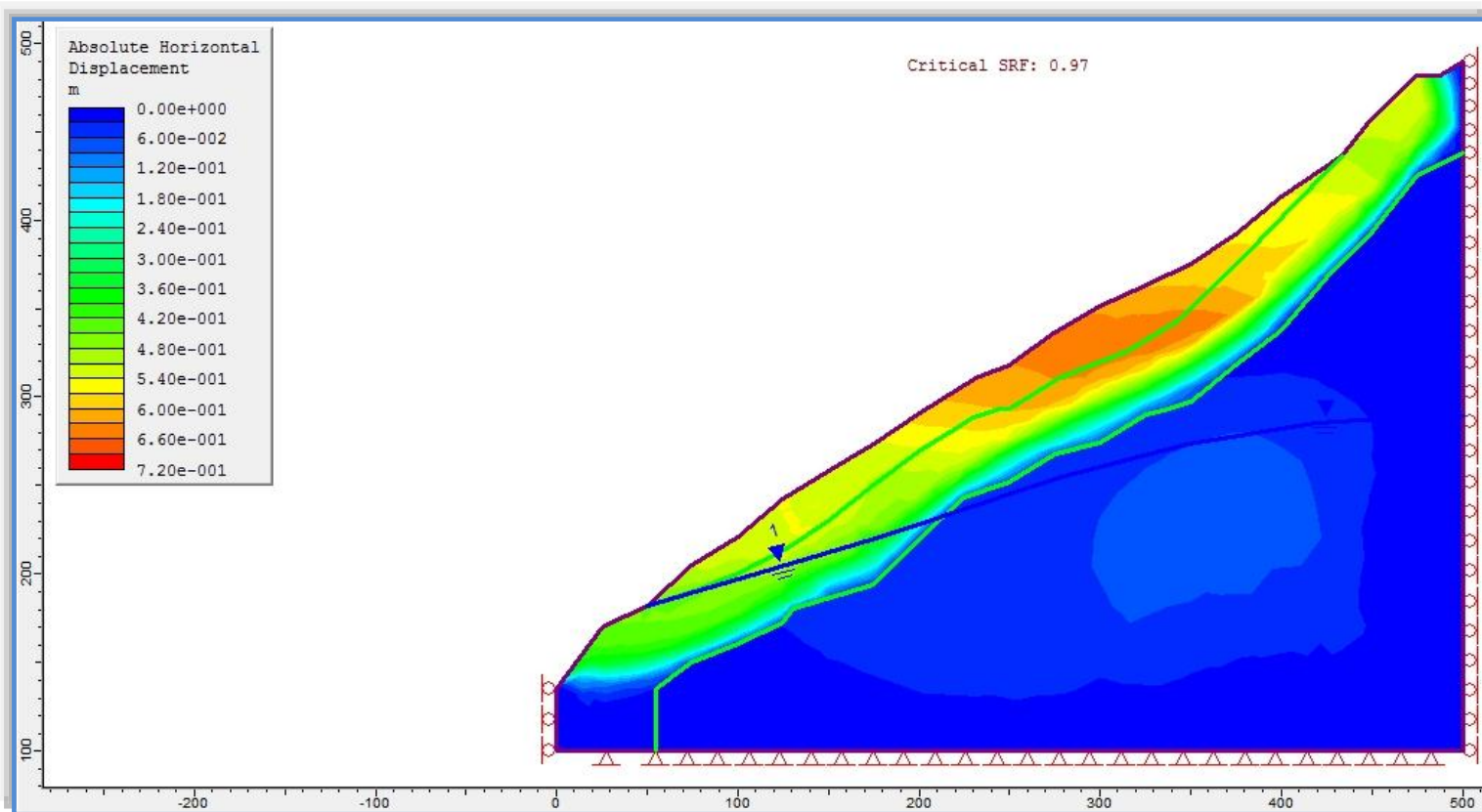


Factor de seguridad calculado para un nivel freático en condiciones probables sobre la superficie. La zona de falla se identifica en el extremo inferior, pero el deslizamiento se produce a lo largo del talud, la coloración anaranjada indica las zonas críticas por un nivel freático en esta condición.

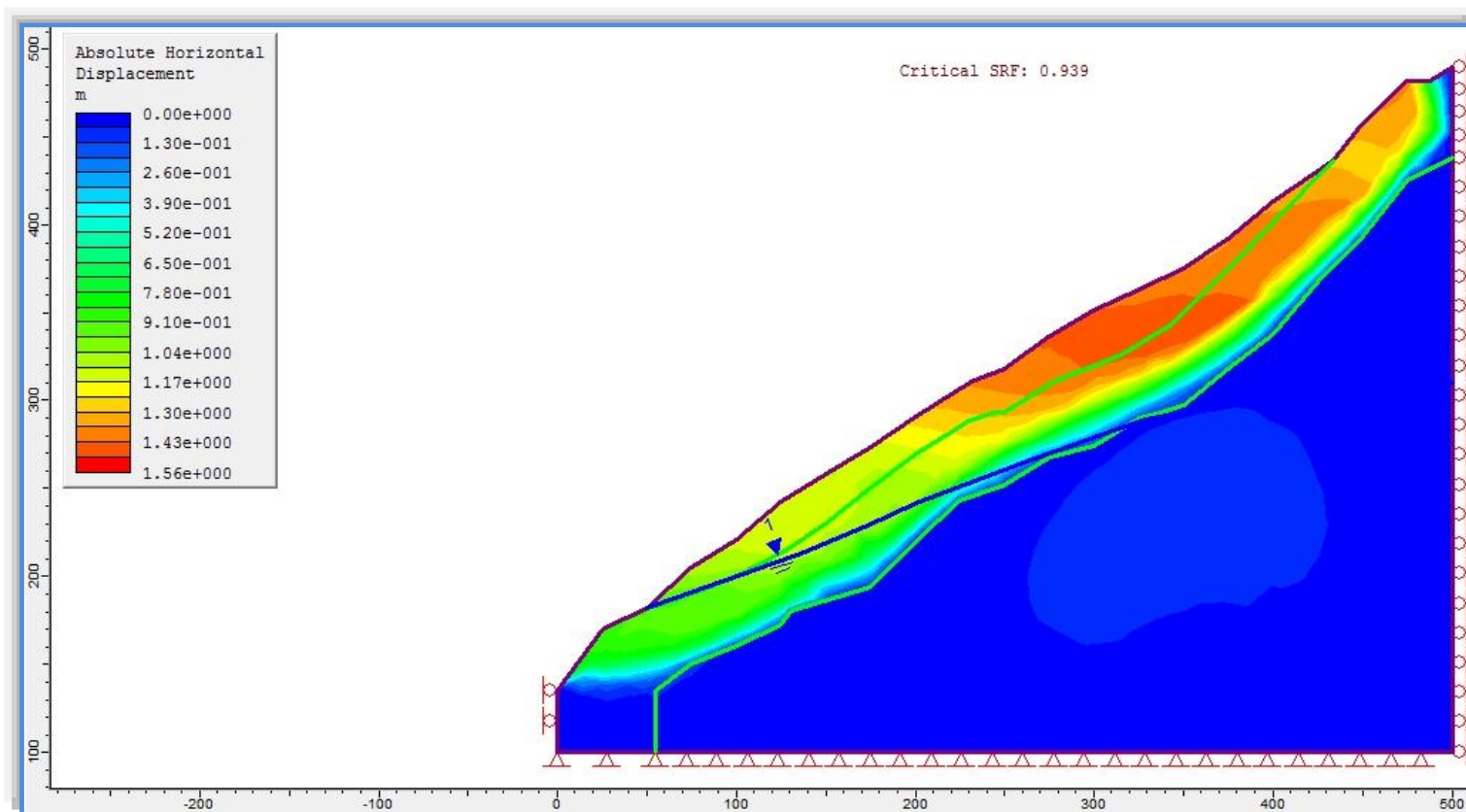


ANEXOS 16:

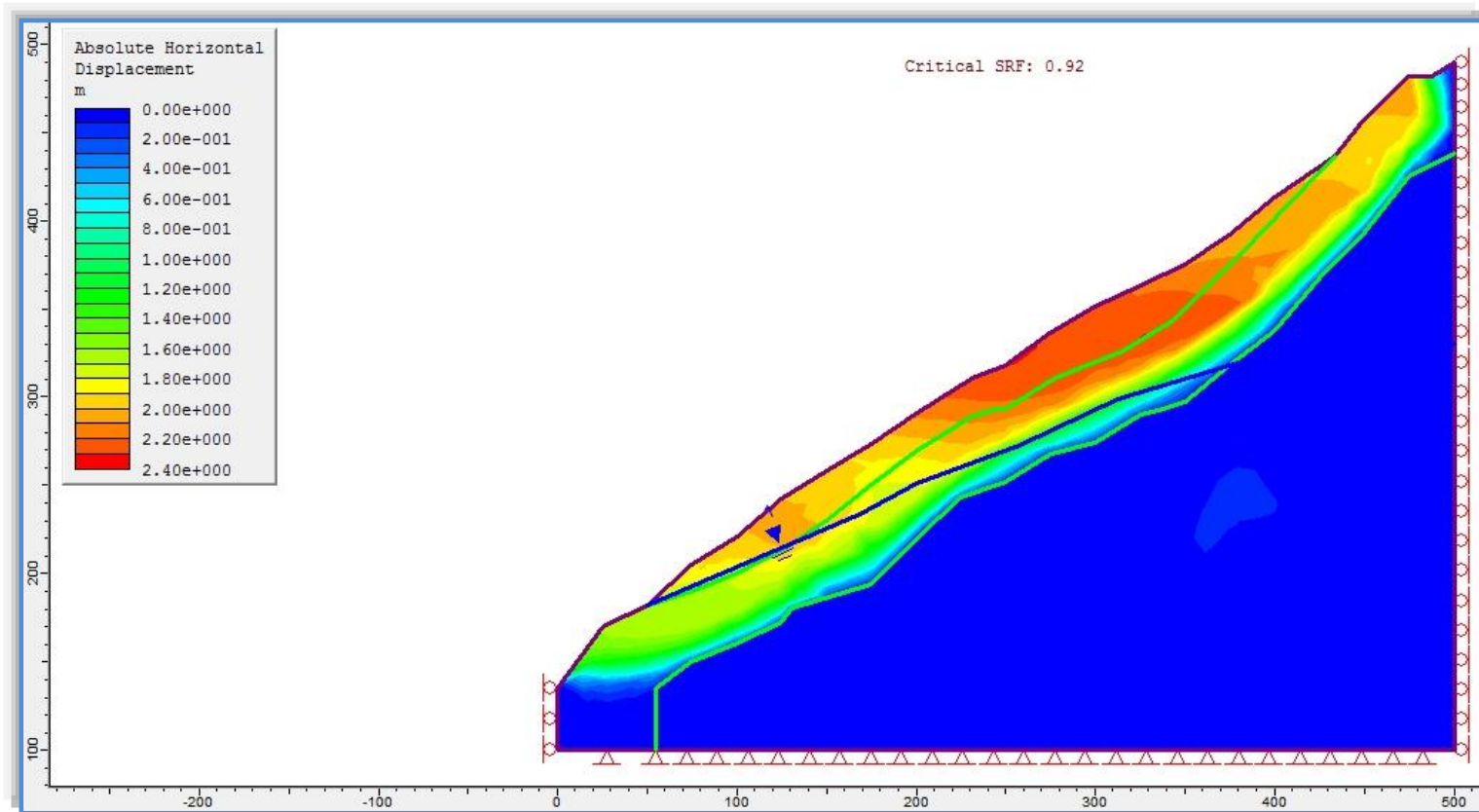
VARIACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD EN FUNCIÓN DEL NIVEL FREÁTICO UTILIZANDO EL PROGRAMA PHASE 2 APLICANDO MEF



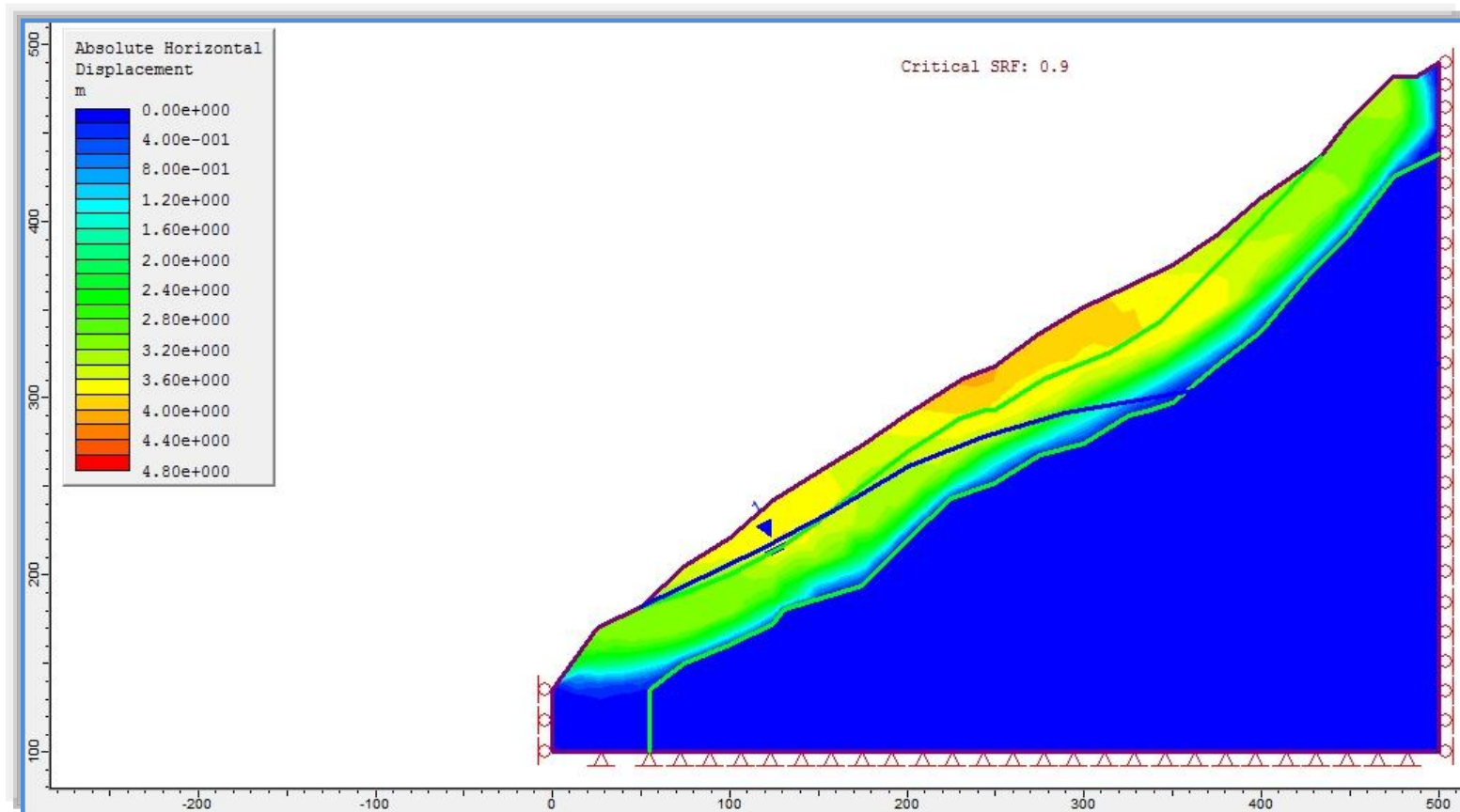
Factor de seguridad calculado en función del nivel freático en condiciones originales, zonas de color amarillo – naranja las que presentan mayor desplazamiento e inestabilidad. El plano de falla identificado por la línea que divide la franja amarilla de la verde es coincidente con el plano de falla asumido y el calculado por el programa SLIDE.



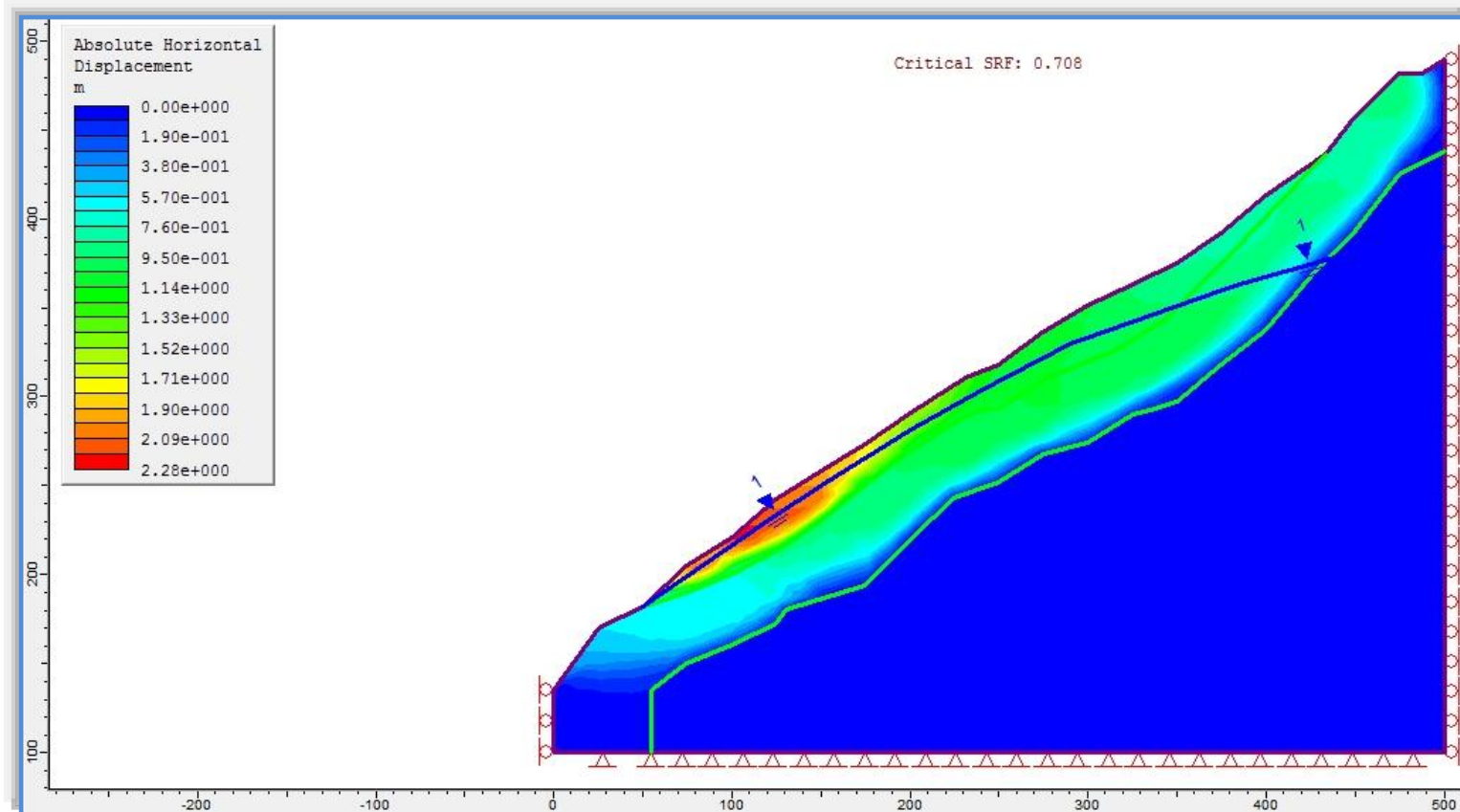
Factor de seguridad calculado en función del nivel freático a 50 metros de profundidad, zonas de color naranja las que presentan mayor desplazamiento e inestabilidad, se identifican por los límites de colores los planos de falla. Guarda similitud con las zonas inestables y el plano de falla calculado por el MEL.



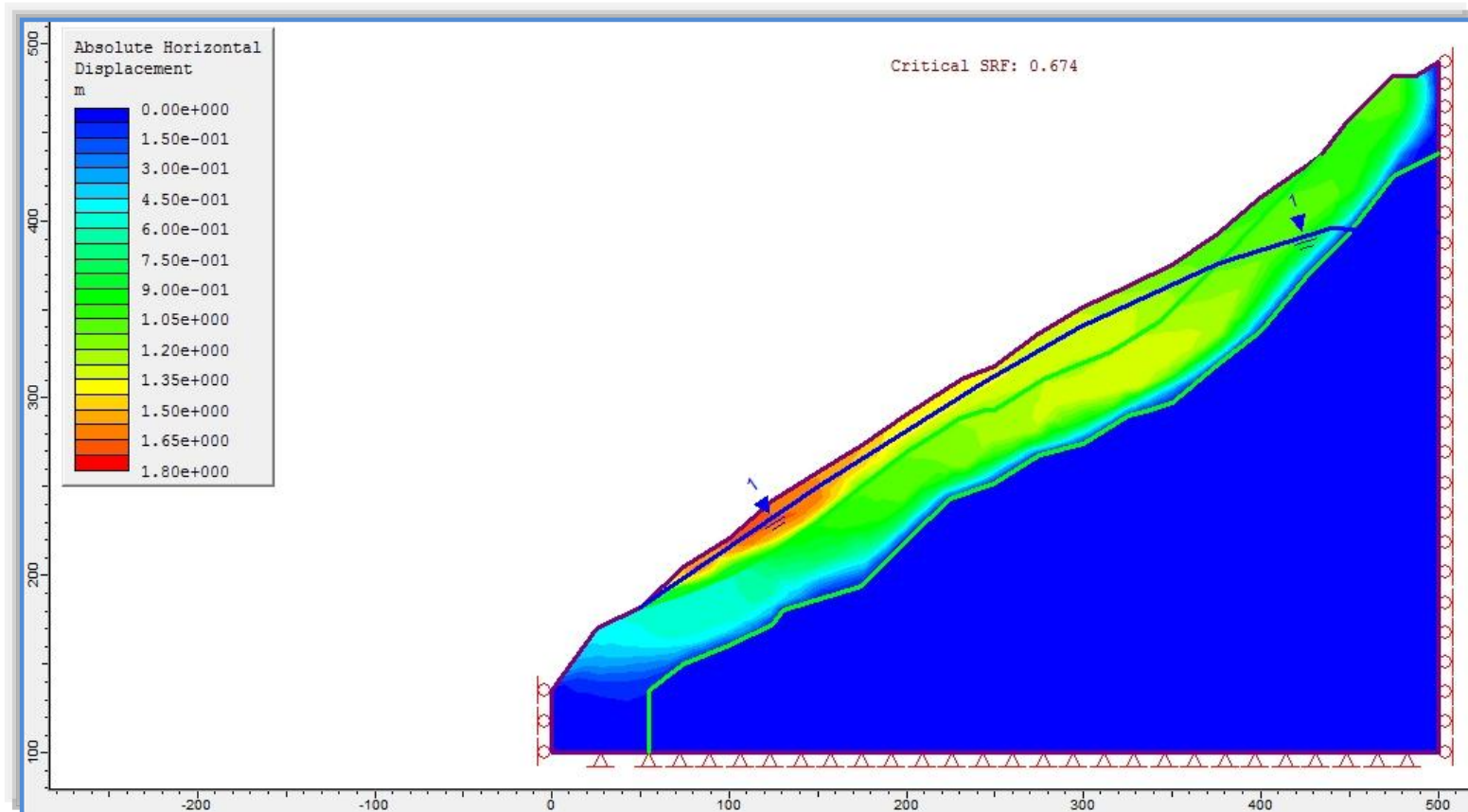
Factor de seguridad calculado en función del nivel freático a 40 metros de profundidad, zonas de color naranja las que presentan mayor desplazamiento e inestabilidad, las zonas inestables aumenta conforme el nivel freático asciende, de igual forma que en la condición anterior, las zonas inestables guardan similitud con las identificadas en el MEL para esta condición.



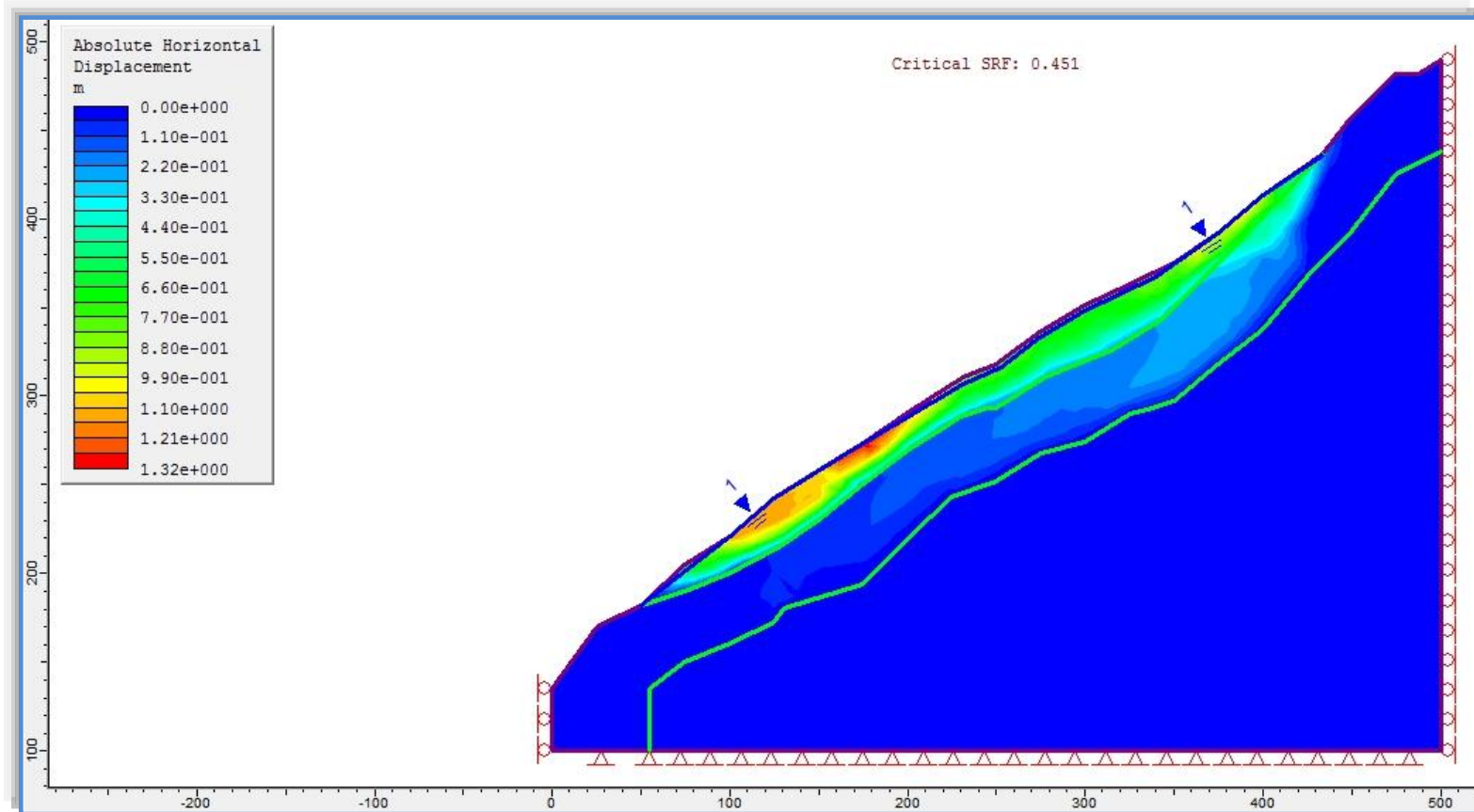
Factor de seguridad calculado en función del nivel freático a 30 metros de profundidad, zonas de color amarillo - naranja las que presentan mayor desplazamiento e inestabilidad, las zonas inestables se empiezan a identificar en el extremo inferior del talud conforme asciende el nivel de agua.



Factor de seguridad calculado en función del nivel freático a 20 metros de profundidad, zonas de color naranja las que presenta el menor factor de seguridad, el talud fracasa a lo largo del color verde y naranja. La zona más crítica coincide con la identificada con en el programa SLIDE para esta condición de nivel freático.



Factor de seguridad calculado en función del nivel freático a 10 metros de profundidad, el extremo inferior de talud presenta la zona de mayor inestabilidad localizada con el menor FS, la masa deslizada corresponde a todo el talud, el de falla por donde se desplazaría se identifica por el límite entre los colores verde y celeste

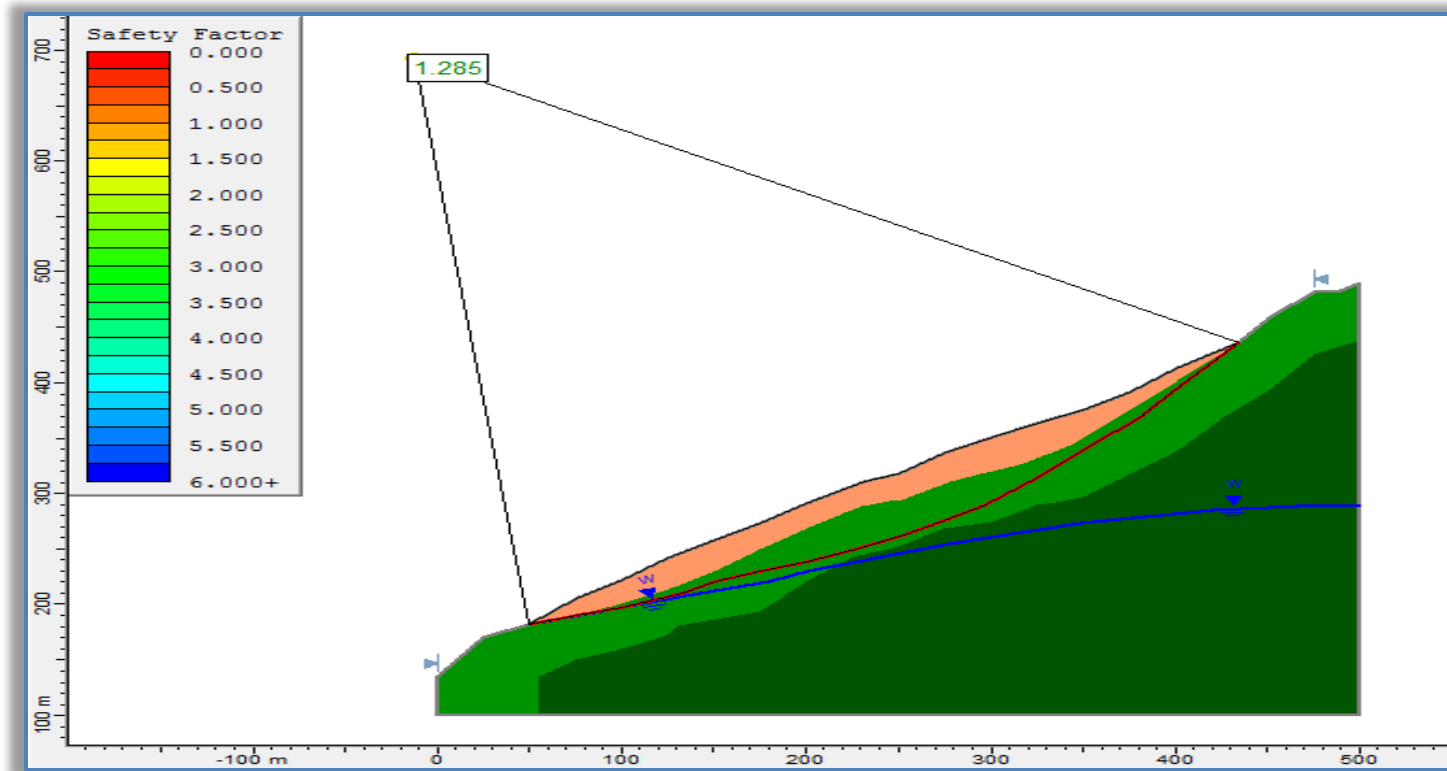


Factor de seguridad calculado en función del nivel freático en la condición más crítica sobre el talud, el talud fracasaría en la Capa Superficial y en la Capa I, los colores naranjas identifican las zonas que primero fracasarían. El modelo coincide con el calculado por el MEL, la zona más inestable se da en el extremo inferior, el movimiento de la masa es a lo largo del talud.

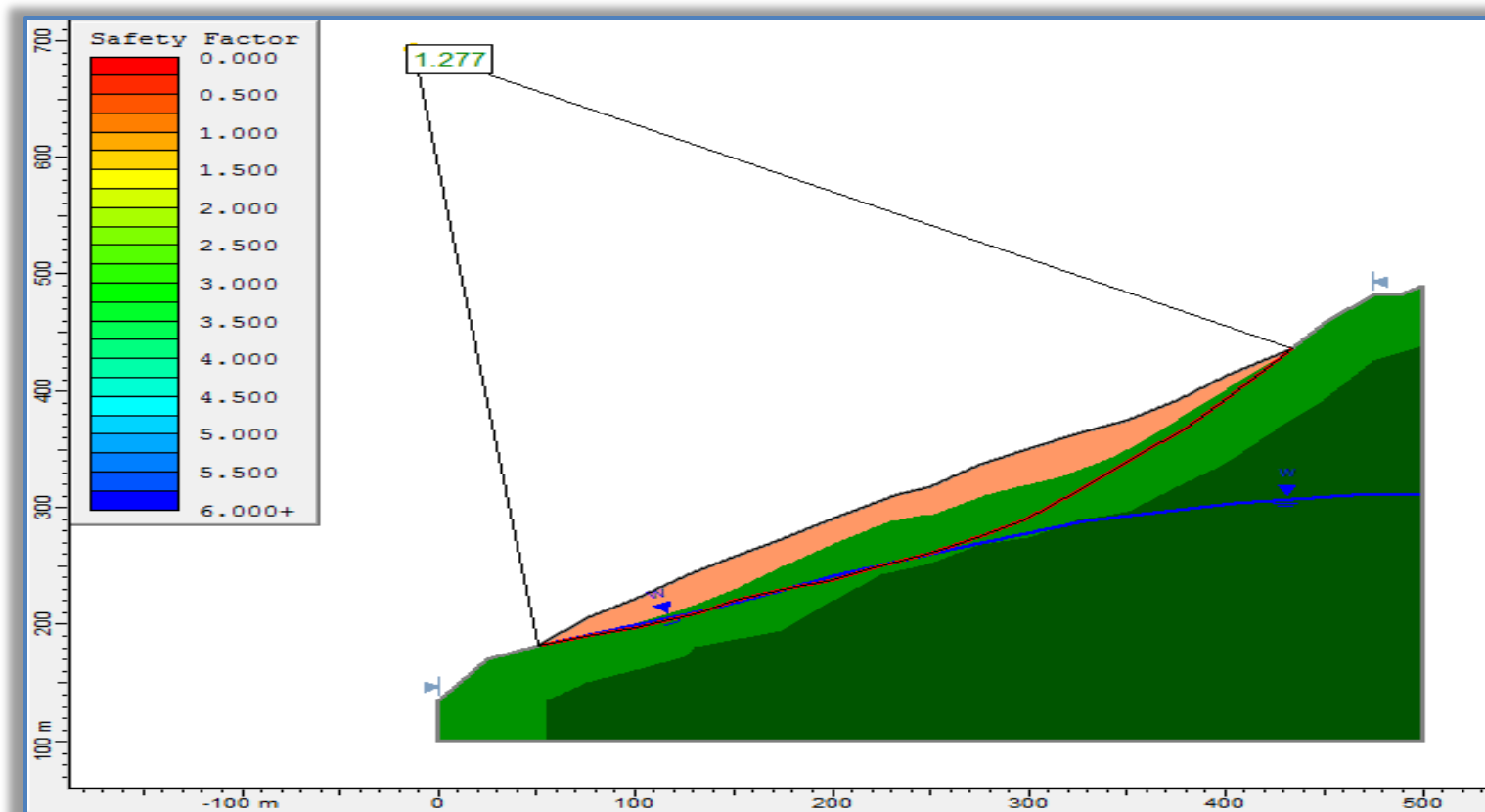


ANEXO 17:

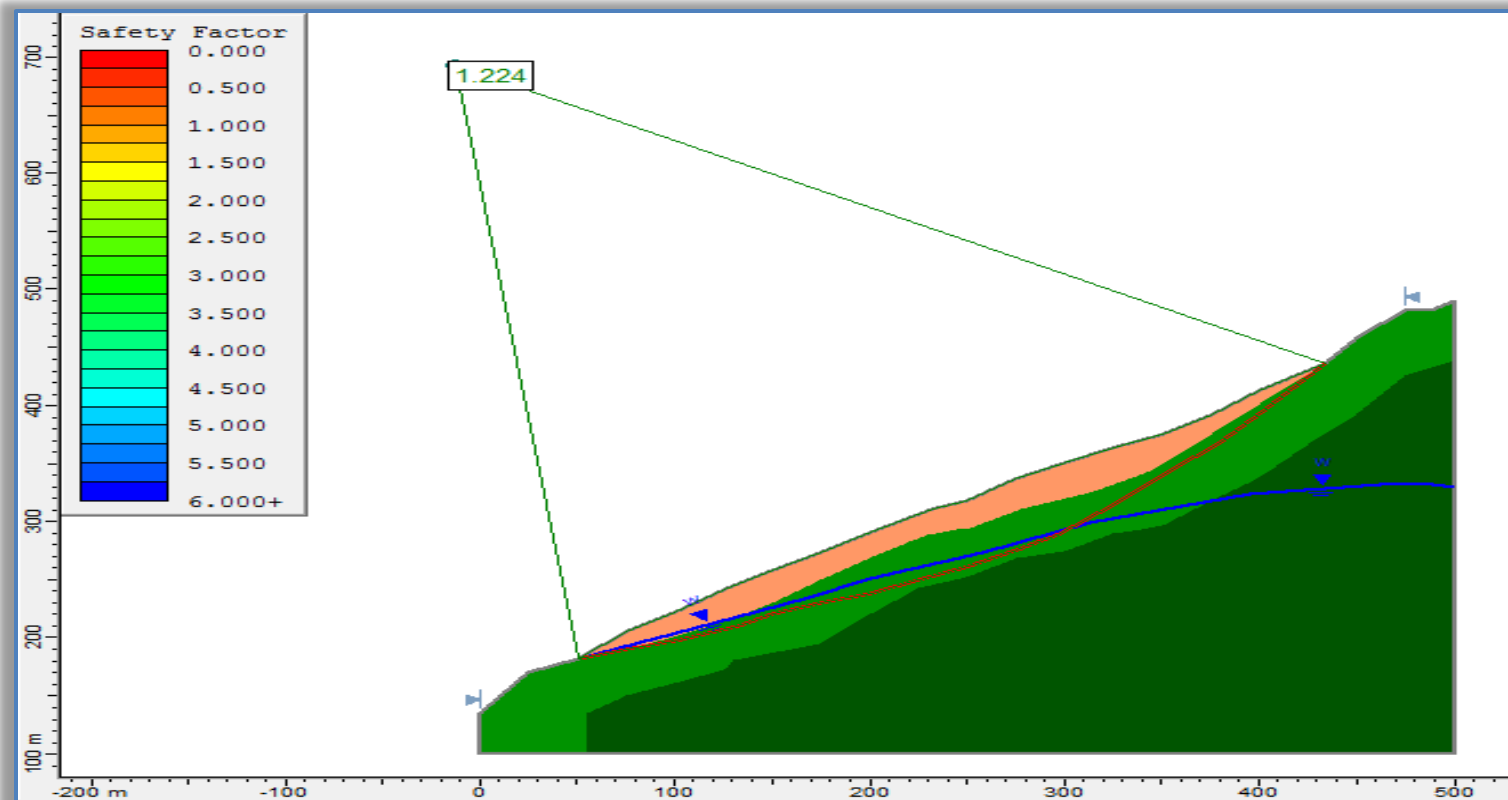
VARIACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD EN FUNCIÓN DEL NIVEL FREÁTICO UTILIZANDO EL PROGRAMA SLIDE APLICANDO EL MEL PARA EL PLANO DE FALLA ASUMIDO EN EL TALUD



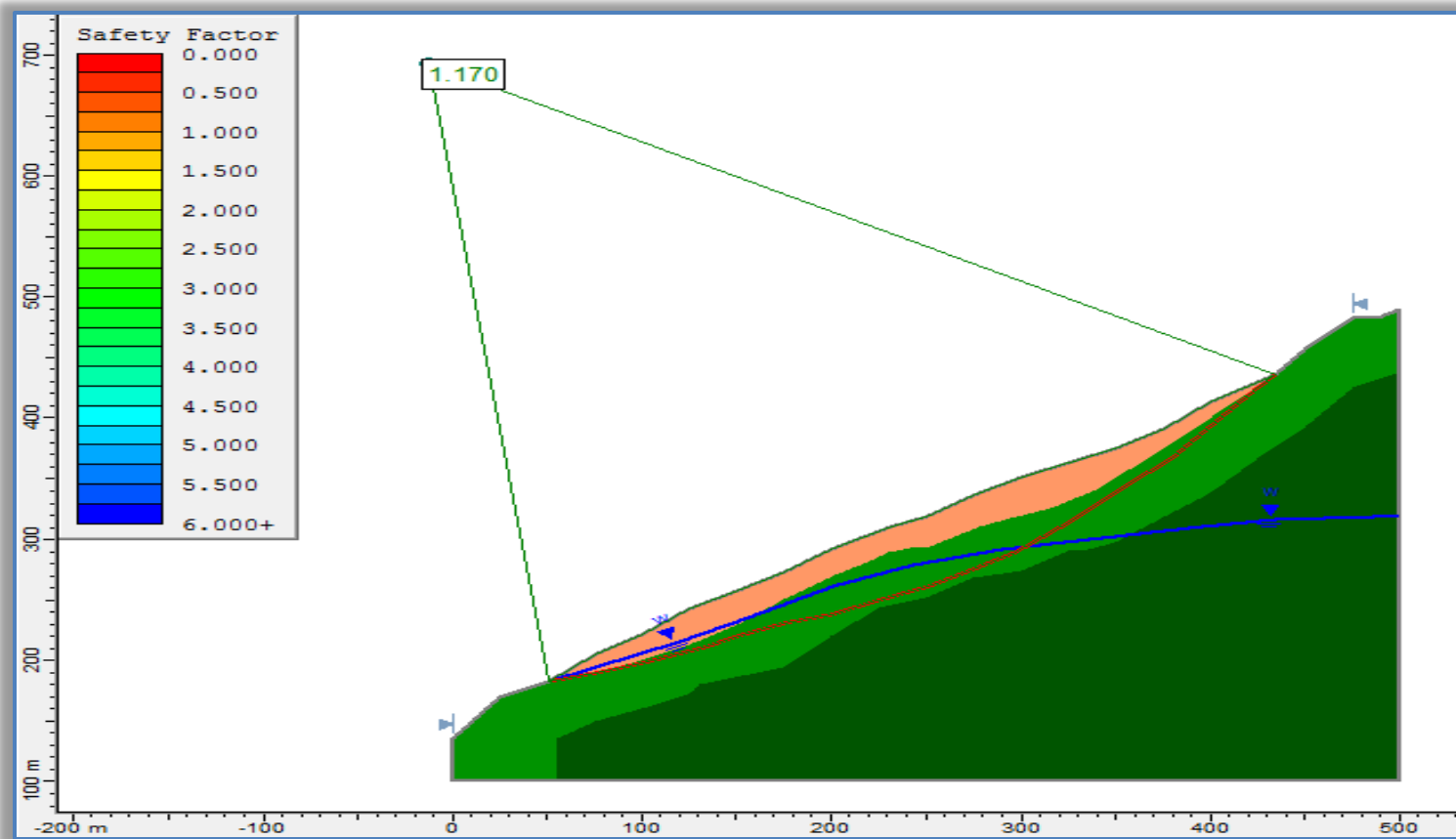
Factor de seguridad calculado para un nivel freático a 62 m de profundidad con plano de falla asumido en función de las perforaciones. El Plano de falla sumido para condiciones originales guarda relación con el plano de falla calculado por los programas SLIDE y PHASE 2, siendo el FS calculado según el plano de falla asumido más conservador que los calculados en la modelación.



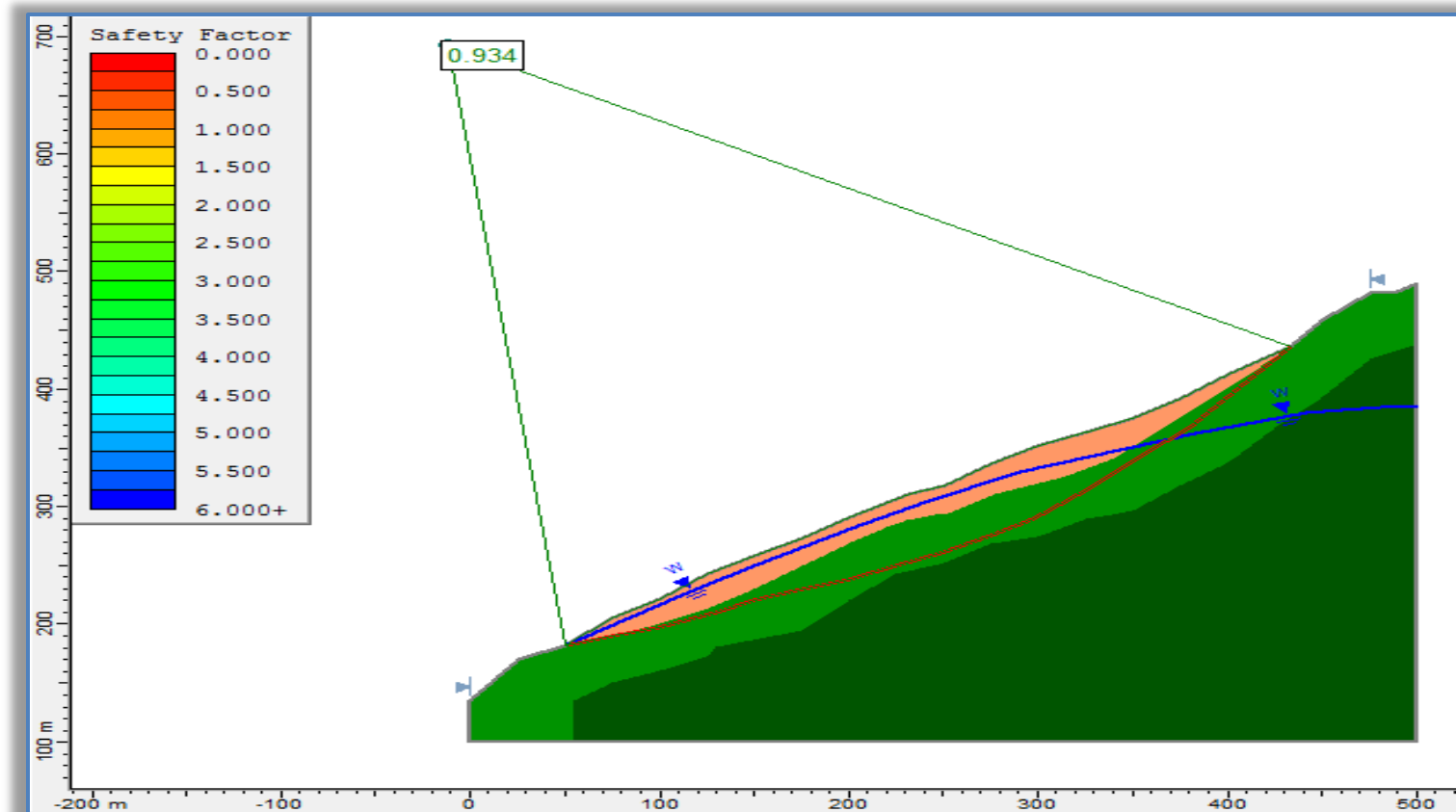
Factor de seguridad calculado para un nivel freático a 50 m de profundidad con plano de falla asumido en función de las perforaciones, conforme asciende el nivel de agua disminuye el FS.



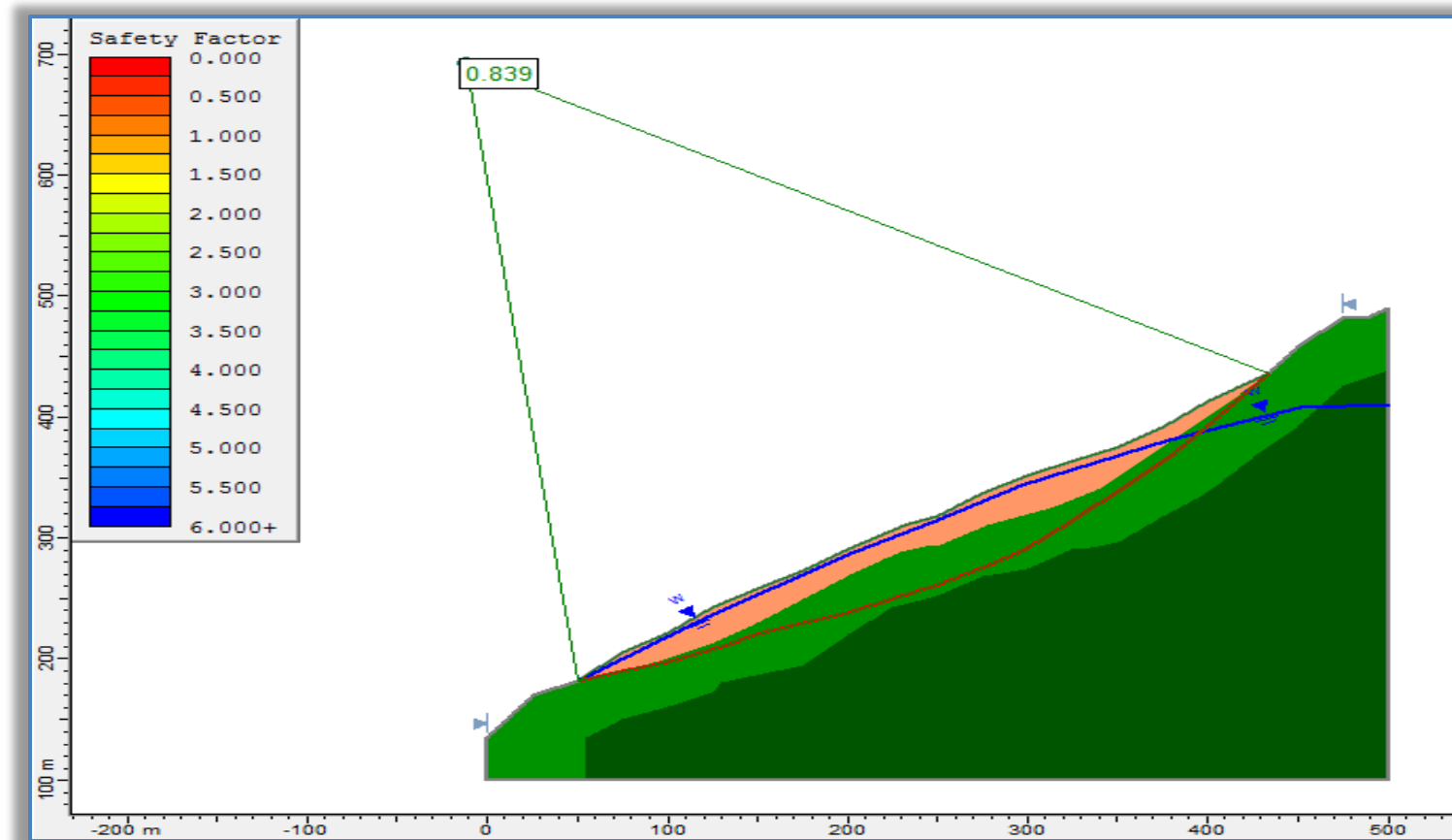
Factor de seguridad calculado para un nivel freático a 40 m de profundidad con plano de falla asumido en función de las perforaciones



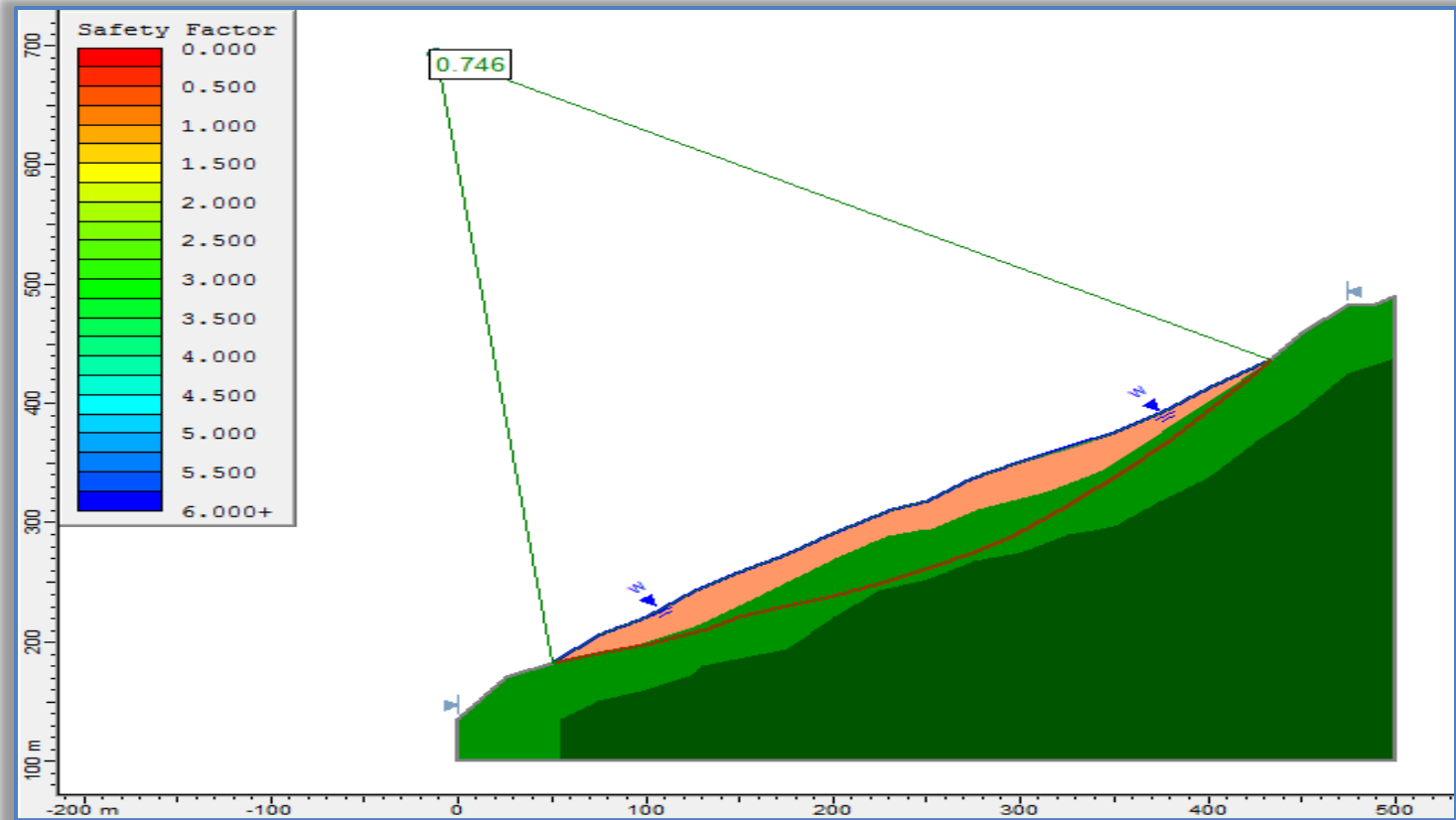
Factor de seguridad calculado para un nivel freático a 30 m de profundidad con plano de falla asumido en función de las perforaciones. Con esta condición de nivel freático con el plano de falla asumido el talud aún se encuentra sobre el límite, mientras que al compararlo con el MEL y el MEF los planos de falla calculados por los programas ya se da un movimiento del talud.



Factor de seguridad calculado para un nivel freático a 20 m de profundidad con plano de falla asumido en función de las perforaciones. Con este nivel freático ya se da un desplazamiento del talud para este plano de falla.



Factor de seguridad calculado para un nivel freático a 10 m de profundidad con plano de falla asumido en función de las perforaciones.



Factor de seguridad calculado para un nivel freático sobre la superficie con plano de falla asumido en función de las perforaciones. Aplicando la misma condición de nivel freático para los planos de falla calculado por los programas SLIDE 5.0 y PHASE 2 en todos los métodos se da un fracaso del talud.